Frank Wilczek

# PODSTAWY

## DZIESIĘĆ KLUCZY DO RZECZYWISTOŚCI

NA ŚCIEŻKACH NAUKI

Prószyński i S-ka

Frank Wilczek

# PODSTAWY

## Dziesięć kluczy do rzeczywistości

Przełożyli
Bogumił Bieniok i Ewa L. Łokas

Prószyński i S-ka

Tytuł oryginału
FUNDAMENTALS
Ten Keys to Reality

Copyright © 2021 by Frank Wilczek
All rights reserved

Projekt okładki
Magdalena Palej

Ilustracje na okładce
© Andriy Onufriyenko/Gettyimages.com

Redaktor serii
Adrian Markowski

Redakcja
Anna Kaniewska

Korekta
Małgorzata Denys

ISBN 978-83-8234-449-3

Warszawa 2021

Wydawca
Prószyński Media Sp. z o.o.
02-697 Warszawa, ul. Rzymowskiego 28
www.proszynski.pl

*Dla Betsy:*

*OBJAWIENIA*
*Zgodne roje cząstek przędą*
*Misterne wzory naszego życia.*
*Narodziny, nauka, miłość, nieubłagana starość –*
*Niezasłużone dary, nieuznawane granice.*
*Przestrzeń rośnie w ciszy, poza naszym zasięgiem.*
*Ciała niebieskie, rozrzucone z rzadka,*
*Świecą, wierne idealnym prawom.*
*Nie znają języka pieśni śpiewanych przy kołysce.*
*Czas to zmiana, wszystkich dosięga tak samo.*
*W pradawnych szczątkach widzimy jego bezkres,*
*A doskonałe zegary świadczą o jego mocy.*
*Czas był przed nami i po nas zostanie.*
*Gdy w swym umyśle stale stwarzam świat na nowo,*
*Zawsze najbliżej będę, ukochana, z Tobą.*

# Przedmowa: zrodzeni na nowo

## I

Ta książka opowiada o podstawowych prawdach, które możemy odkryć, badając fizyczny świat. Znam wiele osób, które ciekawi wszystko, co nas otacza, i chciałyby się dowiedzieć, co na ten temat ma do powiedzenia współczesna fizyka. Są wśród nich prawnicy, lekarze, artyści, uczniowie, nauczyciele, rodzice, jednym słowem, zwyczajni ludzie zainteresowani rzeczywistością. Niewątpliwie są inteligentni, ale brakuje im wiedzy. Zawsze starałem się przekazywać najważniejsze przesłanie nowoczesnej fizyki możliwie najprościej, ale w taki sposób, by nie ucierpiała na tym dokładność moich wyjaśnień. Pisząc tę książkę, miałem przed oczami moich ciekawych świata znajomych i przypominałem sobie ich dociekliwe pytania.

Uważam, że podstawowe prawdy nie ograniczają się wyłącznie do suchych faktów opisujących, jak działa fizyczny świat. Nie ulega wątpliwości, że fakty te są bardzo ważne i na swój sposób piękne, ale równie wielkim osiągnięciem jest tok rozumowania, który pozwolił nam je odkryć. Musimy przy tym pamiętać, że te podstawowe prawdy mówią również o tym, jak my, ludzie, wpisujemy się w szerszą rzeczywistość.

## II

Przyjąłem, że takie podstawowe prawdy obejmują dziesięć obszernych zasad. Każdej z nich poświęciłem oddzielny rozdział. W poszczególnych rozdziałach najpierw wyjaśniam główny temat i opisuję go z różnych perspektyw, a następnie próbuję przewidzieć, jak może się potoczyć dalszy

rozwój danej dziedziny. Popuszczając wodze fantazji, doskonale się bawiłem i mam nadzieję, że rozmyślania na ten temat dostarczą czytelnikom równie wiele satysfakcji. W ten sposób chciałem przekazać jeszcze jedną podstawową prawdę, a mianowicie to, że nasze rozumienie świata fizycznego nieustannie się powiększa i zmienia. Przypomina pod tym względem żywą istotę.

Starałem się wyraźnie oddzielać domysły od faktów i w tym drugim przypadku zawsze wskazywać, jaka jest natura obserwacji i doświadczeń, które pozwoliły je ustalić. Najbardziej podstawowe przesłanie jest bowiem takie, że *udało się* nam zrozumieć wiele aspektów świata fizycznego na bardzo głębokim poziomie. Jak ujął to Albert Einstein, „sam fakt, że [Wszechświat] jest zrozumiały, stanowi prawdziwy cud". To również jest odkrycie okupione ogromnym wysiłkiem.

Właśnie dlatego, że możliwość zrozumienia fizycznego Wszechświata jest tak zaskakująca, musimy udowodnić, iż faktycznie go rozumiemy – nie wystarczy przyjąć to jako założenie. Najbardziej przekonującym dowodem jest fakt, że nasza wiedza, choć wciąż niepełna, pozwoliła nam zrealizować wielkie i wspaniałe cele.

W swoich badaniach staram się zapełniać luki w naszej wiedzy i wymyślać nowe doświadczenia, które pozwolą poszerzać obszar tego, co jest możliwe. Pisanie tej książki było dla mnie okazją do chwili refleksji, dzięki czemu mogłem z dużą przyjemnością przypomnieć sobie największe, najwspanialsze osiągnięcia, które są owocem wysiłków wielu pokoleń uczonych i inżynierów współpracujących ze sobą w przestrzeni i czasie.

## III

*Podstawy* mogą również stanowić alternatywę dla tradycyjnych, ortodoksyjnych systemów religijnych. W książce tej podejmuję wiele zasadniczych pytań stawianych na gruncie religii, ale szukając na nie odpowiedzi, analizuję fizyczną rzeczywistość, a nie święte teksty czy tradycje.

Wielu moich bohaterów naukowych – Galileusz, Johannes Kepler, Isaac Newton, Michael Faraday, James Clerk Maxwell – należało do gorliwych

chrześcijan. (Pod tym względem byli przedstawicielami swoich czasów i otoczenia). Uważali, że mogą zbliżyć się do Boga i oddać mu cześć, badając Jego dzieło. Einstein, choć nie był religijny w konwencjonalnym znaczeniu tego słowa, miał podobne podejście. Często odwoływał się do Boga (czy też raczej do „Starca”, jak Go nazywał), o czym świadczy na przykład jedno z jego najsłynniejszych powiedzeń: „Pan Bóg jest wyrafinowany, ale nie złośliwy”.

Duch ich działań – i moich w tej książce – wykracza poza określone dogmaty, nieważne, czy religijne, czy antyreligijne. Zwykłem wyrażać to następującym stwierdzeniem: badając, jak działa świat, próbujemy ustalić, jak działa Bóg, i tym samym *dowiadujemy się, czym On jest*. Przyjmując taki punkt widzenia, możemy powiedzieć, że poszukiwanie wiedzy jest pewną formą kultu religijnego, a odkrycia są objawieniami.

## IV

Ta książka zmieniła mój sposób patrzenia na świat. W pierwotnym zamierzeniu *Podstawy* miały być opisem naszej wiedzy, ale szybko przerodziły się w kontemplację. Gdy zastanawiałem się nad jej zawartością, zupełnie nieoczekiwanie dostrzegłem dwa tematy przewodnie. Zdumiało mnie, że są tak wyraźne i głębokie.

Pierwszym z nich jest obfitość. Świat jest ogromny. Oczywiście wystarczy spojrzeć w niebo w bezchmurną noc, by się przekonać, że „tam dalej” rozciągają się rozległe połacie przestrzeni. Gdy po uważniejszym zbadaniu wyrazimy ten ogrom za pomocą liczb, otrzymamy wartości, które zwyczajnie nie mieszczą nam się w głowie. Jednak wielkość przestrzeni stanowi tylko jeden z wielu aspektów obfitości Natury i wcale nie ma największego znaczenia dla doświadczenia każdego z nas.

Jak to bowiem ujął Richard Feynman, „na dole jest mnóstwo miejsca”. Ludzkie ciało zawiera o wiele więcej atomów, niż istnieje gwiazd w obserwowalnym Wszechświecie, a liczba neuronów w mózgu jest niemal taka sama jak liczba gwiazd w naszej Galaktyce. Wszechświat wewnętrzny jest godnym dopełnieniem Wszechświata rozciągającego się na zewnątrz.

To, co dotyczy przestrzeni, odnosi się też do czasu. Czas kosmiczny jest nieprzebrany. Jego połać rozciągająca się wstecz do Wielkiego Wybuchu całkowicie przyćmiewa czas ludzkiego życia. Mimo to, jak jeszcze nieraz podkreślimy, czas życia pojedynczego człowieka zawiera więcej świadomych chwil, niż można pomieścić żywotów ludzkich w historii Wszechświata. Zostaliśmy obdarzeni darem obfitości czasu wewnętrznego.

Świat fizyczny również obfituje w niewykorzystane do tej pory możliwości stwarzania i postrzegania. Dzięki odkryciom naukowym wiemy, że w naszym najbliższym otoczeniu znajduje się o wiele więcej energii i użytecznych materiałów w znanej i dostępnej postaci, niż potrafimy to obecnie wykorzystać. Świadomość tego faktu napełnia nas otuchą i pozwala stawiać sobie jeszcze ambitniejsze cele.

Za pomocą naszych zmysłów możemy dostrzec zaledwie kilka skrawków obszernej rzeczywistości, którą ukazują badania naukowe. Weźmy na przykład wzrok. Zmysł wzroku jest naszym najszerszym i najważniejszym oknem na świat zewnętrzny. A jednak tak wielu rzeczy nie możemy dostrzec! Teleskopy i mikroskopy ukazują ogromne bogactwo informacji zawartej w świetle, które w normalnych warunkach wpada do naszych oczu, nie zostawiając po sobie żadnego śladu. Co więcej, ludzki wzrok obejmuje tylko jedną oktawę – zakres fal światła widzialnego – nieskończonej skali muzycznej promieniowania elektromagnetycznego, które rozciąga się od fal radiowych przez mikrofale po podczerwień po jednej stronie i od nadfioletu po promieniowanie rentgenowskie i promienie gamma po drugiej. W dodatku nawet w ramach tej pojedynczej oktawy nasze postrzeganie barw jest niedoskonałe. Choć zmysły nie pozwalają nam dostrzec wielu aspektów rzeczywistości, to jednak dzięki umysłowi możemy wyjść poza te naturalne ograniczenia. Poszerzanie horyzontów naszego postrzegania jest wspaniałą, nigdy niekończącą się przygodą.

## V

Drugim tematem przewodnim książki jest konieczność uświadomienia sobie tego, że jeśli chcemy w pełni docenić fizyczny Wszechświat, to musimy się „urodzić na nowo”.

Gdy zaczynałem pracę nad książką, na świat przyszedł mój wnuk Luke. Podczas pisania wstępnej wersji obserwowałem pierwsze miesiące jego życia. Przyglądałem się, jak z szeroko otwartymi oczami bada własne dłonie i zaczyna sobie uświadamiać, że sprawuje nad nimi kontrolę. Widziałem, jak z ogromną radością uczy się sięgać po przedmioty w świecie zewnętrznym. Byłem świadkiem, jak przeprowadza z nimi pierwsze doświadczenia. Jak upuszcza je, a potem ich szuka, a następnie powtarza wszystko od początku (a potem jeszcze raz i jeszcze raz…), jak gdyby wcale nie był pewien wyniku, a za każdym razem po ich znalezieniu wybucha radosnym śmiechem.

Wykonując takie i inne doświadczenia, Luke budował własny model świata. Podchodził do tego z niezaspokojoną ciekawością i bez większych uprzedzeń. Oddziałując ze światem, dowiadywał się rzeczy, które niemal wszyscy dorośli uważają za oczywiste. Uświadomił sobie na przykład, że świat dzieli się na „ja” i „nie-ja”, że myśli mogą sterować ruchami „ja”, ale nie mają wpływu na „nie-ja”, i że możemy oglądać różne przedmioty, nie zmieniając ich właściwości.

Dzieci są jak uczeni: wykonują doświadczenia i wyciągają z nich wnioski. Jednak przeprowadzane przez nie eksperymenty są z punktu widzenia współczesnej nauki dość prymitywne. Obywają się bez teleskopów, mikroskopów, spektroskopów, magnetometrów, akceleratorów cząstek, zegarów atomowych i wszystkich innych przyrządów, które pomagają nam w budowie najprawdziwszych, najdokładniejszych modeli świata. Wykonując te doświadczenia, dzieci mają dostęp do niewielkiego zakresu temperatur, są zanurzone w atmosferze o bardzo szczególnym składzie chemicznym i ciśnieniu, podlegają przyciąganiu ziemskiej grawitacji (one i wszystko w ich otoczeniu), opierają się na powierzchni Ziemi… i tak dalej.

Małe dzieci tworzą model świata wyjaśniający to, czego doświadczają *w granicach ich postrzegania i środowiska*. Z praktycznego punktu widzenia jest to bez wątpienia dobry plan. Aby móc sobie radzić w otaczającym nas świecie, wystarczy, że we wczesnej młodości nauczymy się, jak działa otaczający nas świat – trudno temu zaprzeczyć.

Jednak współczesna nauka odkrywa przed nami świat fizyczny, który zupełnie nie pasuje do modelu wyniesionego z dzieciństwa. Jeśli ponownie otworzymy się na świat, przepełnieni ciekawością i pozbawieni uprzedzeń

– jeśli pozwolimy sobie urodzić się na nowo – to zrozumiemy go zupełnie inaczej.

Niektórych rzeczy musimy się nauczyć. Nasz świat jest zbudowany z kilku podstawowych elementów, które zachowują się zgodnie z dziwnymi i nieoczywistymi zasadami.

Niektórych rzeczy trzeba się jednak „oduczyć".

Z mechaniki kwantowej wynika, że nie da się wykonywać obserwacji bez wpływu na badany przedmiot. Każda osoba odbiera ze świata zewnętrznego niepowtarzalną wiadomość. Wyobraźmy sobie, że razem z przyjacielem obserwujemy w bardzo ciemnym pokoju jakieś słabe źródło światła. Powoli zmniejszamy jego natężenie, na przykład przykrywając lampę kolejnymi warstwami tkaniny. W końcu do naszych oczu będą dobiegały jedynie sporadyczne błyski. Jednak zarówno my, jak i nasz przyjaciel zobaczymy te błyski w różnych chwilach. Światło uległo rozbiciu na pojedyncze kwanty, a kwantów nie można już dzielić. Na takim podstawowym poziomie każdy z nas widzi inny świat.

Specjaliści od psychofizyki ustalili, że większością naszych działań wcale nie kieruje świadomość, a jedynie docierają do niej raporty z realizacji procesów, którymi sterują nieświadome obszary umysłu, wykonujące całą pracę. Wykorzystując technikę znaną jako przezczaszkowa stymulacja magnetyczna (w skrócie TMS, od ang. *transcranial magnetic stimulation*), naukowiec wykonujący doświadczenie może zupełnie dowolnie pobudzać ośrodki ruchu znajdujące się po lewej lub prawej stronie mózgu pacjenta. Odpowiednio ukształtowany sygnał TMS doprowadzony do prawego ośrodka ruchu spowoduje drgnięcie lewego nadgarstka, natomiast właściwy sygnał doprowadzony do mózgu po lewej stronie wywoła ruch prawego nadgarstka. Alvaro Pascual-Leone wykorzystał tę technikę w bardzo pomysłowy sposób do przeprowadzenia prostego doświadczenia, z którego płyną ważne wnioski. Poprosił badane osoby, by po usłyszeniu komendy zdecydowały, czy chcą poruszyć prawym, czy lewym nadgarstkiem. Potem, po usłyszeniu kolejnego polecenia, miały wykonać zaplanowany wcześniej ruch. Uczestnicy eksperymentu znajdowali się w urządzeniu do neuroobrazowania, badacze mogli więc oglądać, jak ośrodek ruchu każdego pacjenta przygotowuje się do poruszenia nadgarstkiem. Gdy badana osoba podejmowała decyzję, że poruszy prawą ręką, uaktywniał się lewy ośrodek ruchu mózgu, jeśli natomiast zamierzała poruszyć lewym nadgarstkiem, na

ekranie rozświetlał się prawy ośrodek ruchu. Dzięki temu badacze mogli zobaczyć, jakiego wyboru dokonał pacjent, jeszcze zanim wykonał jakikolwiek ruch.

W tym miejscu następuje niespodziewany zwrot akcji. Otóż Pascual-Leone od czasu do czasu wysyłał sygnał TMS odwrotny do tego, co wybrał pacjent. I okazuje się, że taki sztuczny sygnał przeważał nad wyborem pacjenta. W efekcie pacjent wykonywał taki ruch, jaki został mu narzucony przez sygnał TMS, a nie taki, jaki pierwotnie zaplanował. Najciekawsze jest tutaj to, w jaki sposób pacjenci wyjaśniali, co się wydarzyło. Wcale *nie twierdzili*, że jakaś zewnętrzna siła przejęła kontrolę nad ich ciałem. Mówili jedynie: „Zmieniłem zdanie”.

Szczegółowe badania tego zagadnienia pozwoliły ustalić, że wbrew temu, co podpowiada nam intuicja, ludzkie ciało i mózg – czyli fizyczna podstawa naszego „ja” – są zbudowane z tych samych elementów co „nie-ja” i najwyraźniej istnieje między nimi ciągłość.

Gdy w wieku niemowlęcym próbujemy jak najszybciej zrozumieć wszystko, co nas otacza, wytwarzamy mylny obraz świata i samych siebie. Próbując osiągnąć głębsze zrozumienie, musimy więc nie tylko dużo się nauczyć, lecz także wiele „oduczyć”.

## VI

Proces rodzenia się na nowo może wywoływać dezorientację, ale podobnie jak przejażdżka na kolejce górskiej może też być niezwykle pobudzający. Pozwala również liczyć na wspaniały dar: dla tych, którzy urodzą się na nowo w duchu nauki, świat staje się świeżym, klarownym i niezwykle bogatym miejscem. Takie osoby doświadczają tego, co tak wspaniale opisał William Blake:

> Zobaczyć świat w ziarenku piasku,
> Niebiosa w jednym kwiecie z lasu.
> W ściśniętej dłoni zamknąć bezmiar,
> W godzinie – nieskończoność czasu[1].

1 William Blake, *Wróżby niewinności* [w:] William Blake, *Poezje wybrane*, przeł. Zygmunt Kubiak, Ludowa Spółdzielnia Wydawnicza, Warszawa 1991, s. 131 (przyp. tłum.).

# Wprowadzenie

## I

Wszechświat to dziwne miejsce.

Noworodkom świat jawi się jako mieszanina trudnych do rozszyfrowania wrażeń. Próbując je uporządkować, dzieci szybko uczą się odróżniać informacje docierające ze świata wewnętrznego od sygnałów dochodzących z zewnątrz. W świecie wewnętrznym mieszczą się uczucia, takie jak głód, ból, zadowolenie i senność, a także nierealne królestwo snów. Tutaj też rodzą się myśli, które kierują wzrokiem, ruchem, a wkrótce również mową małego dziecka.

Interpretacja świata zewnętrznego wymaga użycia złożonej konstrukcji intelektualnej. Małe dziecko poświęca wiele czasu, by ją zbudować. Uczy się rozpoznawać powtarzające się wzorce wrażeń zmysłowych, na które, w przeciwieństwie do własnego ciała, nie może wpływać myślami. Zaczyna kojarzyć konkretne wzorce z poszczególnymi obiektami. Później przekonuje się, że obiekty te zachowują się w dość przewidywalny sposób.

Z biegiem czasu dziecko uświadamia sobie, że niektóre z tych obiektów są podobne do niego, że są istotami, z którymi można się porozumieć. Wymieniając się z nimi informacją, nabiera przeświadczenia, że one również muszą mieć dostęp do własnego świata wewnętrznego i zewnętrznego oraz, co ciekawe, że mają wiele podobnych cech i zachowują się zgodnie z takimi samymi regułami.

# II

Uświadomienie sobie, w jaki sposób możemy wpływać na wspólny świat zewnętrzny – czyli innymi słowy, na świat fizyczny – jest oczywiście niezwykle ważnym i złożonym problemem praktycznym. Aby na przykład przeżyć w społeczności zbieracko-łowieckiej, nasze dziecko będzie się musiało nauczyć, gdzie można znaleźć wodę, które rośliny i zwierzęta nadają się do jedzenia, a także opanować sztukę tropienia zwierzyny i polowania. Oprócz tego musi nauczyć się gotować posiłki oraz poznać wiele innych faktów i umiejętności.

W bardziej złożonych społecznościach pojawiają się inne wyzwania, takie jak wytwarzanie specjalistycznych narzędzi, wznoszenie trwałych budowli i śledzenie upływu czasu. Członkowie wspólnoty przekazują kolejnym pokoleniom nowo odkryte rozwiązania problemów, jakie stawia przed nami świat fizyczny, i tak powstaje stale powiększający się zasób wiedzy praktycznej. W ten sposób każde społeczeństwo tworzy własną „technologię”.

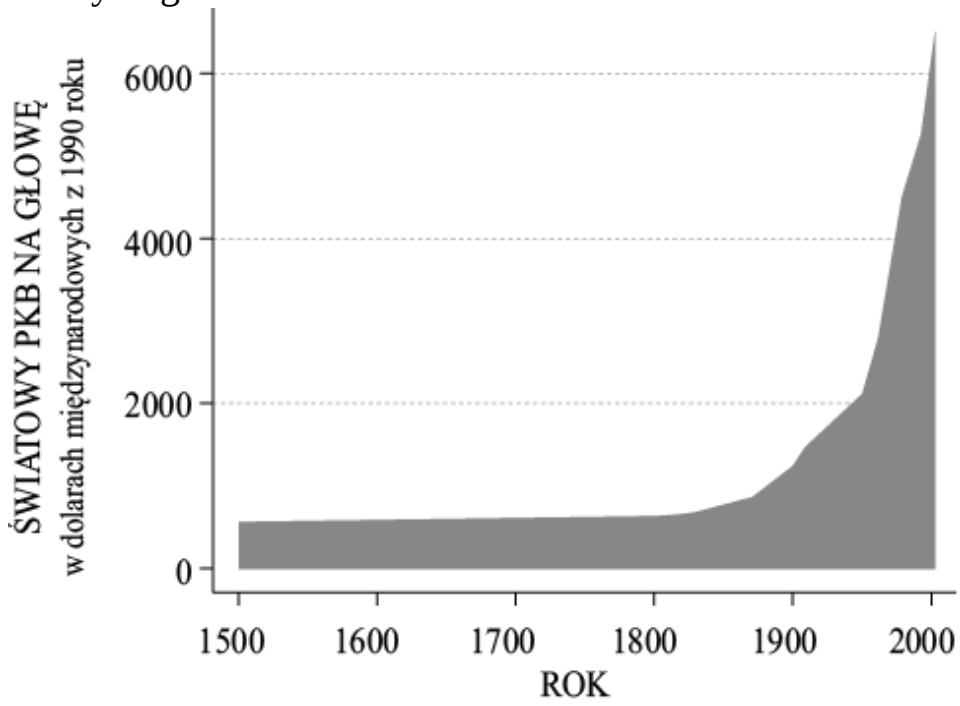
Społeczeństwa przedindustrialne często miały bogaty i złożony zasób różnych technologii. Niektóre z tych rozwiązań pozwalały – i nadal pozwalają – przeżyć w nieprzyjaznym środowisku, takim jak Arktyka czy pustynia Kalahari. Inne były niezbędne do wzniesienia wielkich miast i zbudowania imponujących zabytków, takich jak piramidy w Egipcie i Mezoameryce.

Mimo to na przestrzeni niemal całej historii ludzkości przed pojawieniem się metody naukowej rozwój techniki przebiegał w sposób dość chaotyczny. Nowe rozwiązania techniczne odkrywano najczęściej przypadkiem. Gdy już udało się opracować jakąś działającą technikę, przekazywano ją następnym pokoleniom w postaci bardzo ścisłych procedur, rytuałów i zwyczajów. Rozwiązania te nie tworzyły żadnego logicznego systemu, nie podejmowano też systematycznego wysiłku w celu ich ulepszenia.

Technologie oparte na „zdrowym rozsądku” pozwoliły ludziom przeżyć, rozmnażać się, a nierzadko nawet korzystać z czasu wolnego i osiągnąć spełnienie. Dla większości ludzi żyjących w różnych kulturach na przestrzeni dziejów było to w zupełności wystarczające. Ludzie ci nie mogli

przecież wiedzieć, że w ich życiu czegoś brakuje, nie zdawali sobie też sprawy z tego, że to, czego nie mają, mogłoby być dla nich ważne.

Obecnie wiemy, że nie mieli bardzo wielu rzeczy. Poniższy wykres, pokazujący wzrost wydajności ludzkiej pracy w funkcji czasu, mówi sam za siebie i nie wymaga komentarza.




## III

Nowoczesna metoda badania świata zrodziła się w Europie w XVII stuleciu. Wcześniej w różnych miejscach świata pojawiały się pierwsze przejawy takiego podejścia, ale dopiero całe mnóstwo przełomowych odkryć, znanych ogólnie jako rewolucja naukowa, stał się inspirującym przykładem tego, co może osiągnąć ludzki umysł, jeśli podejdzie do świata fizycznego w sposób twórczy. Metody i koncepcje, które doprowadziły do tych przełomowych odkryć, przekształciły się w jasne modele pokazujące, jak należy prowadzić badania w przyszłości. Za sprawą tego impulsu powstała nauka taka, jaką znamy. Świat zmienił się na dobre.

W wieku XVII nastąpił niespotykany do tej pory rozwój techniki i teorii na wielu frontach, między innymi na polu projektowania maszyn i okrętów,

urządzeń optycznych (w tym pierwszych mikroskopów i teleskopów), zegarów i kalendarzy. Bezpośrednim skutkiem tych zmian było to, że ludzie mogli korzystać z urządzeń o większej mocy, więcej zobaczyć i w bardziej przewidywalny sposób kierować swoim życiem. Jednak rewolucja naukowa okazała się jedyna w swoim rodzaju i w pełni zasłużyła na swoją nazwę za sprawą czegoś, co jest nienamacalne. Tym kluczowym czynnikiem była zmiana podejścia: pojawienie się nowej ambicji, nowej pewności siebie.

Metoda Keplera, Galileusza i Newtona łączy w sobie pokorne podejście, wymagające godzenia się faktami i pilnego obserwowania Natury, z systematycznym zuchwalstwem, polegającym na bezpardonowym wykorzystywaniu wszystkiego, czego udało się nam dowiedzieć, i stosowaniu nowych rozwiązań wszędzie, gdzie się da, nawet w sytuacjach, które wykraczają poza obszar usankcjonowany zebranymi dowodami. Jeśli taki śmiały krok się uda, to odkryjemy coś użytecznego; jeśli nie – to przynajmniej dowiemy się czegoś ważnego. Takie podejście nazywam radykalnym konserwatyzmem i w moim odczuciu jest ono podstawową zdobyczą rewolucji naukowej.

Radykalny konserwatyzm jest zachowawczy, ponieważ wymaga uważnego badania Natury i liczenia się z faktami – są to kluczowe aspekty ogólnie rozumianej metody naukowej. Jest jednak również radykalny, ponieważ każe nam maksymalnie wykorzystywać zdobytą wiedzę. Ta zasada również odgrywa istotną rolę w badaniach naukowych. To dzięki niej nauka wytrwale brnie do przodu.

## IV

Inspiracją do pojawienia się takiego nowego podejścia były przede wszystkim odkrycia w dziedzinie, która już w XVII stuleciu była dobrze ugruntowana i rozwinięta, a mianowicie w mechanice nieba, zajmującej się opisem wyglądu i ruchu ciał niebieskich.

Już od czasów prehistorycznych ludzie dostrzegają takie prawidłowości, jak zmiana cyklu dnia i nocy, następstwo pór roku, fazy Księżyca i uporządkowany ruch gwiazd. Wraz z pojawieniem się rolnictwa kluczowego znaczenia nabrała umiejętność drobiazgowego śledzenia pór

roku, ponieważ dzięki temu można było zaplanować zasiew i żniwa w najlepszej porze. Kolejną ważną, choć chybioną motywacją do prowadzenia dokładnych obserwacji była wiara w astrologię, czyli przekonanie, że ludzkie życie jest bezpośrednio powiązane z rytmem kosmosu. Tak czy inaczej, wiele różnych czynników – włącznie ze zwyczajną ciekawością – sprawiło, że ludzie zaczęli uważniej patrzeć w niebo.

Okazało się, że ogromna większość gwiazd porusza się w dość prosty, przewidywalny sposób. Obecnie wiemy, że ich pozorny ruch wynika z ruchu obrotowego Ziemi wokół jej osi. Tak zwane gwiazdy stałe znajdują się tak daleko, że względnie niewielkie zmiany ich odległości, wynikające z własnego ruchu tych obiektów lub z ruchu Ziemi wokół Słońca, są niezauważalne, gdy patrzymy na nie gołym okiem. Jednak kilka wyjątkowych ciał niebieskich – Słońce, Księżyc i nieliczne „gwiazdy błądzące”, do których zaliczano widoczne gołym okiem planety, czyli Merkurego, Wenus, Marsa, Jowisza i Saturna – nie zachowuje się w taki sposób.

Starożytni astronomowie przez wiele pokoleń zapisywali położenie tych szczególnych ciał niebieskich i w końcu nauczyli się przewidywać ich ruch z dość dużą dokładnością. Wymagało to przeprowadzenia obliczeń z zakresu geometrii i trygonometrii z wykorzystaniem skomplikowanych, ale jednoznacznie określonych wzorów. Ptolemeusz (ok. 100–170) zebrał cały ten materiał w jednym dziele matematycznym, które jest znane jako *Almagest*. (Słowo *magest* to zniekształcony grecki przymiotnik w stopniu najwyższym oznaczający „największy”. Takie samo pochodzenie ma na przykład słowo „majestat”. Przedrostek *al* jest natomiast arabskim przedimkiem określonym).

Synteza Ptolemeusza była wspaniałym osiągnięciem, ale miała dwie wady. Pierwszą była jej złożoność i wynikający z tego brak elegancji opisanych metod. W szczególności we wzorach służących do obliczania ruchu planet występowało wiele liczb, których wartość należało wyznaczyć, dopasowując obliczenia do obserwacji, bez jakichkolwiek głębszych zasad umożliwiających ich wyprowadzenie. Mikołaj Kopernik (1473–1543) zauważył jednak, że wartości niektórych z tych liczb są ze sobą powiązane w zaskakująco prosty sposób. Te z pozoru tajemnicze, „przypadkowe” związki można było wyjaśnić na gruncie geometrii, jeśli

tylko przyjęło się założenie, że Ziemia razem z Wenus, Marsem, Jowiszem i Saturnem obraca się wokół Słońca, które znajduje się w środku (a Księżyc obraca się wokół Ziemi).

Druga wada syntezy Ptolemeusza miała charakter o wiele bardziej bezpośredni, ponieważ okazało się, że zawarte w niej wzory są po prostu niedokładne. Wyprzedzając swoją epokę i pojawienie się dzisiejszej „wielkiej nauki", Tycho Brahe (1546–1601) skonstruował skomplikowane przyrządy i wybudował kosztowne obserwatorium, dzięki czemu mógł śledzić ruch planet z dużo większą dokładnością. W wynikach jego obserwacji wyraźnie było widać odchylenia od przewidywań Ptolemeusza.

Johannes Kepler (1571–1630) postanowił opracować geometryczny model ruchu planet, który będzie prosty i dokładny. W swojej pracy uwzględnił idee Kopernika i wprowadził kilka innych ważnych zmian do modelu Ptolemeusza. W szczególności przyjął, że orbity planet krążących wokół Słońca nie muszą być doskonałymi okręgami – w jego modelu mogą one mieć kształt elips ze Słońcem w jednym z ognisk. Ponadto założył, że prędkość ruchu orbitalnego planet zmienia się z odległością od Słońca w taki sposób, iż planety zakreślają w jednakowych odstępach czasu jednakowe pole powierzchni. Po tych ulepszeniach uzyskał o wiele prostszy model, który w dodatku dawał dużo dokładniejsze przewidywania.

Tymczasem Galileusz (1564–1642) zainteresował się tym, co dzieje się na powierzchni Ziemi, i przeprowadził szczegółowe badania prostych postaci ruchu, takich jak toczenie się kuli po równi pochyłej i oscylacje wahadła. Mogłoby się wydawać, że takie przyziemne analizy, polegające na wyznaczaniu liczb oznaczających położenie i czas, będą zupełnie nieprzydatne w poszukiwaniu odpowiedzi na wielkie pytanie o to, jak działa świat. Nie ulega wątpliwości, że w oczach większości współczesnych mu uczonych, których zajmowały wielkie kwestie filozoficzne, były to działania trywialne. Jednak Galileusz chciał zdobyć wiedzę zupełnie innego rodzaju. Wolał zrozumieć *coś* dokładnie, niż opisać *wszystko* w sposób niejasny. Chciał znaleźć – i znalazł – jednoznaczne wzory matematyczne w pełni opisujące jego proste obserwacje.

Isaac Newton (1643–1727) połączył geometryczny opis ruchu planet z dynamicznym opisem ruchu ciał na Ziemi. Udowodnił, że zarówno zaproponowaną przez Keplera teorię ruchu planet, jak i przedstawioną przez Galileusza teorię szczególnych rodzajów ruchu można najlepiej

wyjaśnić, jeśli przyjmiemy, że są to szczególne przypadki bardziej ogólnego prawa, które obowiązuje wszystkie ciała znajdujące się w dowolnym miejscu przestrzeni i w każdym czasie. Teoria Newtona, znana obecnie jako mechanika klasyczna, odnosiła sukces za sukcesem. Pozwoliła wyjaśnić pływy morskie na Ziemi, przewidzieć trajektorie komet i skonstruować nowe cuda techniki.

Dzieło Newtona w przekonujący sposób dowodzi, że poszukując odpowiedzi na wielkie pytania, możemy powoli konstruować rozwiązanie, jeśli wyjdziemy od szczegółowego zrozumienia najprostszych przypadków. Newton nazwał to podejście metodą *analizy i syntezy*. Stało się ono wzorem do naśladowania dla wszystkich uczonych prowadzących badania w duchu radykalnego konserwatyzmu.

Oto jak sam Newton opisał swoją metodę:

> Jak w matematyce, tak w filozofii naturalnej badania trudnych zagadnień metodą analizy zawsze powinny poprzedzać zastosowanie metody syntezy. Taka analiza polega na przeprowadzeniu doświadczeń i obserwacji, a także na wyciągnięciu ogólnych wniosków na drodze indukcji. […] Dzięki temu za pomocą analizy możemy przejść od związków do składników, od ruchów do wywołujących je sił i, w ogólnym przypadku, od skutków do ich przyczyn, a także od szczególnych przypadków do bardziej ogólnych tak długo, aż argumentacja zakończy się na najogólniejszym problemie. Na tym polega metoda analizy, natomiast synteza wymaga przyjęcia, że odkryte i ustalone przyczyny odgrywają rolę zasad, za pomocą których należy wytłumaczyć wynikające z nich zjawiska i przedstawić wyjaśnienie.

## V

Zanim zostawimy Newtona, warto przytoczyć jeszcze jeden cytat wyjaśniający związek łączący go z poprzednikami, Galileuszem i Keplerem, a także z nami, którzy wiele lat później kroczymy jego śladem:

> Zadanie wyjaśnienia całej natury jest zbyt trudne dla jednego człowieka, a nawet dla jednego pokolenia. O wiele lepiej jest zrobić tylko odrobinę, ale rzetelnie, i zostawić resztę dla innych, którzy przyjdą po nas.

Bliższa nam w czasie uwaga Johna R. Pierce'a, jednego z twórców współczesnej nauki o informacji, pięknie ukazuje różnice między nowoczesnym pojęciem wiedzy naukowej i innymi podejściami tego typu:

> Wymagamy, by nasze teorie dokładnie zgadzały się z szerokim zakresem zjawisk, które mają wyjaśniać. I nalegamy, by wynikały z nich użyteczne wskazówki, a nie tylko uzasadnienia.

Pierce doskonale zdawał sobie sprawę, że takie wygórowane standardy wiążą się z koniecznością poniesienia dotkliwej straty. Wymagają pożegnania się z naiwnością. „Nigdy już nie zrozumiemy natury tak dobrze jak greccy filozofowie. […] Za dużo wiemy". Moim zdaniem to nie jest zbyt wysoka cena. Tak czy inaczej, to bez znaczenia, ponieważ nie ma już powrotu.

# I

# Co istnieje

# 1

# Istnieje mnóstwo przestrzeni

## MNÓSTWO NA ZEWNĄTRZ I MNÓSTWO W ŚRODKU

Gdy mówimy, że coś jest duże – nieważne, czy chodzi o obserwowalny Wszechświat, czy ludzki mózg – to powinniśmy zapytać: duże w porównaniu z czym? Naszym naturalnym punktem odniesienia jest zakres zjawisk, z jakimi mamy do czynienia na co dzień. To właśnie one tworzą kontekst naszych pierwszych modeli świata, które tworzymy w dzieciństwie. Zakres świata fizycznego, w takim rozumieniu, jakie wynika z badań naukowych, jest czymś, co odkrywamy dopiero wtedy, gdy zdobędziemy się na to, by ponownie się narodzić.

Jeśli przyjmiemy skalę odpowiadającą zjawiskom znanym z codzienności, to możemy stwierdzić, że świat istniejący „tam na zewnątrz" jest naprawdę gigantyczny. *Bezkres zewnętrznej przestrzeni* jest tym, co wyczuwamy intuicyjnie, gdy w bezchmurną noc spoglądamy na rozgwieżdżone niebo. Czujemy, bez potrzeby przeprowadzania rygorystycznej analizy, że we Wszechświecie występują odległości o wiele większe od rozmiaru ludzkiego ciała i większe od każdej odległości, jaką będziemy mogli kiedykolwiek przebyć. Wiedza naukowa nie tylko potwierdza to uczucie ogromu, ale także znacznie je rozszerza.

Skala świata jest tak wielka, że ludzie mogą się czuć nią przytłoczeni. Francuski matematyk, fizyk i myśliciel religijny Blaise Pascal (1623–1662) również miał takie przeświadczenie i bardzo go to niepokoiło. „Wszechświat ogarnia mnie i pochłania jak punkt"[2] – pisał.

Podobne odczucia – w uproszczeniu: „jestem *bardzo* mały, nie mam znaczenia we Wszechświecie" – często przewijają się w literaturze, filozofii i teologii. Możemy je odnaleźć w wielu modlitwach i psalmach. Takie

wrażenia są naturalną reakcją na fakt, że kondycja ludzka jest bez znaczenia z punktu widzenia kosmosu, jeśli weźmiemy pod uwagę jego rozmiar.

Możemy się jednak pocieszać, że sama wielkość to nie wszystko. Nasz *wewnętrzny bezkres* jest subtelniejszy, ale równie głęboki. Aby się o tym przekonać, powinniśmy spojrzeć na wszystko od drugiej strony, czyli z dołu do góry. Na dole jest bardzo dużo miejsca. Pod wieloma względami, które naprawdę są ważne, jesteśmy ogromni.

W szkole dowiadujemy się, że podstawowymi elementami strukturalnymi materii są atomy i cząsteczki. Jeśli weźmiemy pod uwagę tak zdefiniowaną jednostkę, to okaże się, że ludzkie ciało jest gigantyczne. Liczba atomów w ciele jednego człowieka wynosi około $10^{28}$ – to jest jedynka z 28 zerami: 10 000 000 000 000 000 000 000 000 000.

Tak duża liczba jest większa od wszystkiego, co potrafimy sobie wyobrazić. Możemy ją nazwać – dziesięć kwadryliardów – a przy odrobinie wiedzy i odpowiednich umiejętnościach praktycznych – nawet obliczyć. Wartość ta przekracza jednak całkowicie możliwości naszej intuicji, która wykształciła się na podstawie zjawisk znanych z codzienności, bo przecież w normalnej sytuacji nigdy nie pojawia się potrzeba posługiwania tak dużą liczbą. Wyobrażenie sobie tylu pojedynczych kropek wykracza poza możliwości ludzkiego mózgu.

Liczba gwiazd, które możemy zobaczyć gołym okiem w bezksiężycową noc, gdy powietrze jest odpowiednio czyste, wynosi w najlepszym przypadku kilka tysięcy. Dziesięć kwadryliardów – liczba atomów w naszym ciele – to wartość około miliona razy większa od liczby gwiazd w całym obserwowalnym Wszechświecie. W tym bardzo konkretnym sensie możemy powiedzieć, że w naszym wnętrzu kryje się cały wszechświat.

Walt Whitman (1819–1892), uduchowiony poeta amerykański, wyczuwał instynktownie ten nasz wewnętrzny bezkres. W poemacie *Pieśń o sobie* napisał: „Jestem pojemny, zawieram miliony”[3]. Radosne wychwalanie obfitości przez Whitmana jest oparte na równie obiektywnych faktach jak kosmiczna zawiść Pascala, ale ma przy tym dużo większe znaczenie dla naszego codziennego doświadczenia.

Świat jest ogromny, ale człowiek wcale nie jest mały. Bliższe prawdy będzie stwierdzenie, że istnieje mnóstwo przestrzeni, zarówno gdy spojrzymy w górę, jak i wtedy, gdy spoglądamy w dół. Nie musimy

zazdrościć Wszechświatowi tego, że jest taki ogromny. My też jesteśmy wielcy. Mamy na tyle duży rozmiar, że możemy pomieścić Wszechświat zewnętrzny w swoim umyśle. Pascal również pocieszał się tą myślą i po smutnej konstatacji: „wszechświat ogarnia mnie i pochłania jak punkt" dopisał podnoszące na duchu stwierdzenie: „myślą, ja go ogarniam"[4].

Obfitość przestrzeni – zarówno na zewnątrz, jak i wewnątrz – stanowi główny temat tego rozdziału. Najpierw przyjrzymy się uważniej twardym faktom, a potem spróbujemy wyjść nieco poza nie.

## ZEWNĘTRZNA OBFITOŚĆ: CO WIEMY I JAK SIĘ TEGO DOWIEDZIELIŚMY

### *Preludium: geometria i rzeczywistość*

Naukowe analizy kosmicznych odległości bazują na naszym rozumieniu przestrzeni fizycznej i metod jej mierzenia, czyli na geometrii. Zacznijmy więc od omówienia związku między geometrią i rzeczywistością.

Bezpośrednie, codzienne doświadczenie uczy nas, że ciała mogą się przemieszczać z miejsca na miejsce, nie zmieniając przy tym swoich własności. Prowadzi to do pojawienia się idei „przestrzeni" jako swoistego pojemnika, w którym natura umieściła wszystko, co istnieje.

Praktyczne potrzeby mierzenia terenu, wznoszenia budowli i nawigacji zaowocowały wymyśleniem metod pomiaru odległości i kątów między pobliskimi obiektami. Dzięki temu udało nam się odkryć pewne łatwo dostrzegalne prawidłowości geometrii euklidesowej.

Z biegiem czasu zakres praktycznego zastosowania tych metod znacznie się poszerzył, wzrosła też potrzeba uzyskania dokładnych wyników, ale mimo to opracowany przed wiekami formalizm sprawdzał się nadspodziewanie dobrze. Geometria euklidesowa odnosiła tak wielkie sukcesy, a jej struktura logiczna była tak imponująca, że rzadko kiedy podejmowano badania mające na celu sprawdzenie, czy faktycznie stanowi ona dobry opis fizycznej rzeczywistości. Na początku XIX wieku Carl Friedrich Gauss (1777–1855), jeden z największych matematyków w historii, doszedł do wniosku, że warto dokonać takiej weryfikacji,

i w tym celu zmierzył kąty trójkąta utworzonego przez trzy odległe stacje górskie w Niemczech. W efekcie stwierdził, że w granicach błędów pomiarowych wartości tych kątów sumują się do 180°, tak jak przewidział Euklides. Używany obecnie system nawigacji satelitarnej GPS również opiera się na geometrii euklidesowej. Użytkownicy tego systemu każdego dnia przeprowadzają miliony doświadczeń takich samych jak eksperyment Gaussa, ale są one wykonywane w dużo większej skali i ze znacznie większą dokładnością. Przyjrzymy się więc, jak działa ten system.

Aby ustalić swoje położenie za pomocą systemu GPS, musimy odebrać sygnały przesyłane przez sztuczne satelity krążące wysoko nad Ziemią, które dokładnie wiedzą, gdzie się znajdują. (Zaraz powiemy, jak *to* jest możliwe). Obecnie wokół kuli ziemskiej krąży ponad trzydzieści satelitów rozmieszczonych w strategicznych miejscach. Przesyłane przez nie sygnały nie dają się przekształcić do postaci komunikatów głosowych lub muzyki. Sygnały te zawierają po prostu informację o tym, gdzie znajduje się dany satelita, zapisaną w formacie wygodnym do przetworzenia w komputerze. W wiadomości znajduje się również liczba oznaczająca czas wysłania komunikatu. Każdy satelita ma na swoim pokładzie doskonały zegar atomowy i dzięki temu możemy żywić pewność, że informacja o czasie nadania komunikatu jest dokładna. A zatem:

1. Nasze urządzenie GPS odbiera sygnały docierające z kilku satelitów. Odbiornik, który otrzymuje również sygnały przesyłane przez rozległą sieć zegarów naziemnych, oblicza następnie, ile czasu potrzebowały poszczególne sygnały satelitarne, by do nas dotrzeć. Ponieważ sygnały przemieszczają się ze znaną prędkością – prędkością światła – wyznaczony czas pozwala obliczyć odległość dzielącą nas od każdego satelity.
2. Wykorzystując obliczone odległości, położenia satelitów i geometrię euklidesową, komputer w odbiorniku oblicza położenie urządzenia – czyli nas – za pomocą triangulacji.
3. Komputer wyświetla wynik i już wiemy, gdzie jesteśmy.

Poprawnie działające urządzenie GPS musi uwzględniać jeszcze wiele skomplikowanych poprawek, ale ogólna zasada działania nawigacji satelitarnej jest właśnie taka. System ten do złudzenia przypomina

„eksperyment myślowy” Alberta Einsteina, który posłużył mu do opisania układów odniesienia w jego oryginalnym artykule poświęconym szczególnej teorii względności. W 1905 roku Einstein przewidział wykorzystanie wiązek światła i informacji o czasie ich przesłania do ustalania położenia w przestrzeni. Bardzo spodobał mu się taki pomysł, ponieważ pozwala wykorzystać technikę opartą na podstawach fizyki – na stałej prędkości światła – do wyznaczenia kształtu przestrzeni. Jak widać, czasami technika potrafi dogonić eksperymenty myślowe.

W ramach ćwiczeń wyobraźni możemy rozważyć sytuację, w której obliczyliśmy odległość do czterech satelitów znajdujących się w ustalonych miejscach. Po chwili zastanowienia powinniśmy dojść do wniosku, że ta informacja w zupełności wystarcza, by jednoznacznie wyznaczyć nasze położenie.

(Mała podpowiedź: punkty znajdujące się w ustalonej odległości od satelity tworzą wokół niego powierzchnię kuli. Jeśli weźmiemy dwie takie sfery określone wokół dwóch różnych satelitów, to mogą się one ze sobą przecinać. Jeśli tak jest, to punkty ich przecięcia utworzą okrąg. Oczywiście w ogólnym przypadku sfery nie muszą się przecinać, ale ponieważ nasze położenie znajduje się gdzieś na ich przecięciu, nie mają wyjścia – muszą na siebie nachodzić! Teraz rozważmy trzecią sferę odpowiadającą trzeciemu satelicie, która przecina ten okrąg. W ogólnym przypadku te trzy sfery będą się przecinały w dwóch punktach. Czwarta sfera wokół kolejnego satelity pozwoli nam jednoznacznie wybrać jeden z tych dwóch punktów).

Teraz powróćmy do pytania o to, skąd satelity systemu GPS wiedzą, gdzie się znajdują. Szczegóły techniczne są w tym wypadku dość skomplikowane, ale podstawowa idea jest prosta: na samym początku satelity wyruszają z miejsca o znanym położeniu, a potem uważnie śledzą własny ruch. Wykorzystując obie te informacje, mogą obliczyć swoje aktualne położenie.

Konkretnie rzecz biorąc, aby satelity mogły śledzić swój ruch, na ich pokładzie montuje się żyroskopy i akcelerometry, bardzo podobne do tych, jakie stosuje się w nowoczesnych telefonach komórkowych. Rejestrując wskazania tych przyrządów, komputer pokładowy może wyznaczyć przyspieszenie satelity na podstawie równań fizycznych mechaniki newtonowskiej. Mając tę informację, może następnie obliczyć przesunięcie

satelity, wykorzystując do tego rachunek różniczkowy i całkowy. Prawdę powiedziawszy, Newton wymyślił rachunek różniczkowy i całkowy właśnie po to, by rozwiązywać tego typu zadania.

Jeśli jeszcze raz uważnie prześledzimy cały proces, przekonamy się, że inżynierowie projektujący system nawigacji satelitarnej przyjęli wiele nieoczywistych założeń. Działanie tego systemu bazuje na idei, że prędkość światła jest stała. W satelitach montuje się bardzo dokładne zegary atomowe, których konstrukcja jest możliwa dzięki wykorzystaniu zaawansowanych zasad teorii kwantowej. Komputery pokładowe stosują rozwiązania z zakresu mechaniki klasycznej do obliczenia położenia satelitów na orbicie. Ponadto w obliczeniach uwzględnia się również poprawki wynikające z efektu przewidzianego przez ogólną teorię względności, z którego wynika, że upływ czasu zmienia się nieznacznie z odległością od powierzchni Ziemi. Jak się bowiem okazuje, zegary chodzą wolniej w pobliżu powierzchni Ziemi, gdzie pole grawitacyjne jest silniejsze.

Ponieważ działanie systemu GPS zależy od tylu dodatkowych założeń, a nie tylko od adekwatności geometrii euklidesowej, nie możemy twierdzić, że stanowi ono wyraźne, bezsprzeczne potwierdzenie faktu, iż geometria ta wiernie opisuje rzeczywistość. Prawdę mówiąc, poprawne działanie nawigacji satelitarnej nie jest jednoznacznym, przejrzystym potwierdzeniem żadnej pojedynczej zasady. Jest to skomplikowany system bazujący na rozbudowanej sieci założeń.

Każde z tych założeń mogłoby się okazać błędne lub, mówiąc bardziej dyplomatycznie, prawdziwe jedynie w przybliżeniu. Gdyby którekolwiek z założeń przyjętych przez inżynierów było „prawdziwe w przybliżeniu” w stopniu znacznie odbiegającym od rzeczywistości, to urządzenia GPS dawałyby niezgodne wyniki. Mogłyby na przykład wyznaczać różne położenie w zależności od tego, jaki zestaw satelitów został użyty do triangulacji. Przy intensywnym korzystaniu z takiego systemu musiałyby się ujawnić ukryte wady.

I odwrotnie, poprawne działanie systemu GPS powinno umocnić nasze przekonanie o poprawności *wszystkich* przyjętych założeń, włącznie z tym, że geometria euklidesowa z dużą dokładnością opisuje rzeczywistą geometrię przestrzeni w ziemskiej skali. Warto więc podkreślić, że do tej pory system GPS działa bez zarzutu.

Mówiąc ogólnie, nauka rozrasta się wokół uznanych zasad. Najnowocześniejsze, najbardziej śmiałe doświadczenia i rozwiązania techniczne bazują na skomplikowanej sieci teorii podstawowych. Gdy okazuje się, że takie wymyślne rozwiązania działają zgodnie z oczekiwaniami, nasza ufność w poprawność teorii leżących u ich podstaw wzrasta. Fakt, że podstawowa wiedza tworzy splątaną, wzajemnie wzmacniającą się sieć idei, jest jednym z tematów przewodnich tej książki.

Zanim zakończymy to preludium, muszę przedstawić jedno ważne zastrzeżenie. Gdy będziemy rozważali przestrzeń w gigantycznych kosmicznych skalach (tak jak to za chwilę nastąpi), gdy będziemy ją analizowali z niespotykaną dokładnością lub gdy zajmiemy się zjawiskami zachodzącymi w pobliżu czarnych dziur, geometria euklidesowa przestanie być dobrym opisem rzeczywistości. W swojej szczególnej i ogólnej teorii względności (z 1905 i 1915 roku) Albert Einstein udowodnił ten fakt za pomocą równań i zasugerował, co należy zrobić, by poradzić sobie z tą trudnością. W następnych latach jego teoretyczne idee zostały potwierdzone w licznych doświadczeniach.

W szczególnej teorii względności Einstein wyjaśnił, że zawsze gdy staramy się zmierzyć „odległość”, musimy uważnie się zastanowić, co tak naprawdę mierzymy i jak wykonujemy pomiar. Prawdziwe pomiary wymagają czasu, a to oznacza, że w trakcie ich wykonywania obiekty mogą się przemieszczać. Tak naprawdę możemy jedynie zmierzyć odległość między *zdarzeniami*. Położenie zdarzenia określa się zarówno w przestrzeni, jak i w czasie. Geometrię badanych zdarzeń należy zatem rozważać w ramach obszerniejszego formalizmu, czyli czasoprzestrzeni, a nie samej tylko przestrzeni. Z ogólnej teorii względności dowiadujemy się również, że geometria czasoprzestrzeni może ulec zakrzywieniu pod wpływem obecności materii, mogą się nawet wytworzyć fale takich zaburzeń, które się w niej przemieszczają. (Więcej na ten temat powiemy w rozdziałach 4 i 8).

W ramach takiego obszerniejszego formalizmu czasoprzestrzeni i ogólnej teorii względności geometria euklidesowa służy nam jako przybliżenie lepszych teorii. Jest na tyle dokładna, że możemy się nią posługiwać w wielu praktycznych zastosowaniach, o których przed chwilą była mowa. Geodeci, architekci i konstruktorzy sond kosmicznych wykorzystują geometrię euklidesową, ponieważ uchodzi im to na sucho, a jej

zastosowanie ułatwia pracę. Choć bardziej zaawansowane teorie dają dokładniejsze wyniki, to jednak są o wiele bardziej skomplikowane w użyciu.

Fakt, że geometria euklidesowa nie stanowi pełnego modelu rzeczywistości, w niczym nie umniejsza jej matematycznej spójności ani nie przekreśla jej wielu sukcesów. Pokazuje to jednak, że Gauss wykazał się dużą mądrością, gdy w duchu radykalnie konserwatywnego podejścia postanowił sprawdzić oczywiste, zdawałoby się, fakty. Ostatnie słowo w kwestii związku między geometrią i rzeczywistością należy wyłącznie do Natury.

*Mierzenie Wszechświata*

Przeprowadziwszy pomiary najbliższej przestrzeni, możemy się zabrać do mierzenia kosmosu. Podstawowymi narzędziami, które nam to umożliwiają, są różnego rodzaju teleskopy. Poza dobrze znanymi urządzeniami wykorzystującymi światło widzialne astronomowie korzystają również z teleskopów, które zbierają „światło” z innych zakresów widma elektromagnetycznego. Rejestrują one między innymi fale radiowe, mikrofale, podczerwień, nadfiolet, promieniowanie rentgenowskie i promienie gamma. W niebo są wycelowane również bardziej nietypowe „oczy”, które w ogóle nie wykorzystują promieniowania elektromagnetycznego – wśród nich na szczególną uwagę zasługują działające od niedawna detektory fal grawitacyjnych. O tych ciekawych urządzeniach powiemy nieco więcej w dalszych rozdziałach.

Zaczniemy od przytoczenia zaskakująco prostego wniosku, jaki płynie z tych pomiarów. Potem wyjaśnimy, w jaki sposób astronomowie do niego doszli. To jest już bardziej skomplikowane, ale wziąwszy pod uwagę kontekst tych badań, należy przyznać, że i tak nie jest zbyt trudne.

Po pierwsze, zauważmy, że najbardziej podstawowy wniosek jest taki, iż wszędzie występuje ten sam rodzaj materii. Co więcej, z obserwacji wynika, że w całym kosmosie obowiązują takie same prawa.

Po drugie, badacze odkryli, że materia tworzy uporządkowaną hierarchię struktur. Gdziekolwiek spojrzymy, wszędzie dostrzegamy gwiazdy. W większości przypadków tworzą one galaktyki zawierające od kilku milionów do miliardów gwiazd. Naszej macierzystej gwieździe, Słońcu,

towarzyszy świta planet i księżyców (a także komet, planetoid oraz pięknych „pierścieni” Saturna i innych niewielkich odłamków). Jowisz, największa planeta Układu Słonecznego, ma masę wynoszącą około jednej tysięcznej masy Słońca, natomiast masa Ziemi to zaledwie trzy milionowe masy Słońca. Mimo dość skromnej masy planety i ich księżyce są szczególnie bliskie naszemu sercu. Oczywiście żyjemy na jednej z nich i mamy dobre powody, by sądzić, że na innych planetach także mogą istnieć pewne formy życia – jeśli nie w Układzie Słonecznym, to gdzieś indziej. Astronomowie od dawna podejrzewali, że wokół innych gwiazd również mogą krążyć planety, ale dopiero niedawno pojawiły się możliwości techniczne ich wykrycia. Do chwili obecnej odkryto już setki planet pozasłonecznych i bezustannie napływają nowe doniesienia o zaobserwowaniu kolejnych tego typu obiektów.

Po trzecie, z badań wynika, że cała ta materia jest rozłożona niemal równomiernie w całej przestrzeni. We wszystkich kierunkach i na wszystkich odległościach dostrzegamy mniej więcej taką samą gęstość galaktyk.

Później uściślimy i uzupełnimy te trzy podstawowe wnioski, wprowadzając między innymi pojęcia Wielkiego Wybuchu, ciemnej materii i ciemnej energii. Jednak najważniejsze przesłanie nie ulegnie zmianie: wszędzie odkrywamy takie same substancje uporządkowane w taki sam sposób i materia ta, w całej swojej ogromnej obfitości, jest rozłożona jednorodnie w obserwowanym Wszechświecie.

W tym miejscu w zupełnie naturalny sposób pojawia się pytanie o to, w jaki sposób astronomowie doszli do tak daleko idących wniosków. Spróbujmy to wyjaśnić, przedstawiając przy okazji konkretne wartości rozmiarów i odległości.

Nie jest wcale oczywiste, w jaki sposób należy mierzyć odległości do bardzo dalekich obiektów. Przecież nie możemy w tym wypadku przyłożyć linijki, rozwinąć taśmy mierniczej ani odebrać sygnału radiowego zawierającego informację o dokładnym czasie jego nadania. Astronomowie muszą więc zamiast tego stosować metodę kroków pośrednich, znaną jako *drabina kosmicznych odległości*. Każdy szczebel tej drabiny pozwala nam dotrzeć na większą odległość. Dobre zrozumienie procesów związanych z jednym szczeblem przygotowuje nas do wspięcia się na kolejny.

Możemy rozpocząć od mierzenia odległości w bezpośrednim sąsiedztwie Ziemi. Wykorzystując technikę podobną jak w systemie GPS – to znaczy odbijając światło (lub sygnały radiowe) od różnych obiektów i mierząc czas od wysłania do powrotu sygnału – określimy odległości na Ziemi, a także odległości z Ziemi do innych obiektów w Układzie Słonecznym. Istnieje kilka sposobów wykonania takich pomiarów, w tym kilka bardzo pomysłowych, choć niezbyt dokładnych metod wymyślonych przez starożytnych Greków. Dla naszych celów wystarczy, jeśli zauważymy, że wszystkie te metody dają zgodne wyniki.

Sama Ziemia jest niemal doskonałą kulą o promieniu wynoszącym około 6400 kilometrów. W epoce podróży samolotowych taką odległość możemy sobie bez trudu wyobrazić. Jest ona mniej więcej równa drodze, jaką należałoby pokonać, by przelecieć z Nowego Jorku do Sztokholmu. Patrząc w przeciwnym kierunku, możemy zauważyć, że jest to nieco więcej niż połowa odległości między Nowym Jorkiem i Szanghajem.

Istnieje jeszcze inny sposób określania odległości, który doskonale sprawdza się w astronomii i kosmologii i jest z powodzeniem wykorzystywany w tych dziedzinach. Mam tu na myśli wyznaczanie odległości przez podanie czasu, jakiego potrzebowałby promień światła, by ją pokonać. W odniesieniu do promienia Ziemi wartość ta wynosi na przykład około jednej pięćdziesiątej sekundy. Mówimy zatem, że promień Ziemi ma długość jednej pięćdziesiątej sekundy świetlnej.

Na wyższych szczeblach drabiny kosmicznych odległości uczeni operują wartościami wyrażonymi w latach, a nie w sekundach świetlnych, bo tak jest wygodniej. Aby się do tego przyzwyczaić, powiedzmy na początek, wyłącznie w celu uświadomienia sobie właściwych proporcji, że promień Ziemi ma długość około jednej miliardowej roku świetlnego. Nie zapominajmy o tej niewielkiej liczbie, gdy zaczniemy mierzyć coraz dalsze odległości w otaczającym nas świecie. Na naszej liście bardzo szybko pojawią się liczby wyrażone w całych latach świetlnych, a potem w setkach, milionach i wreszcie miliardach lat.

Kolejną kluczową wartością w naszej skali jest odległość Ziemi od Słońca. Wynosi ona około 150 milionów kilometrów. Wartość ta jest równa 8 minutom świetlnym, czyli około 15 milionowym roku świetlnego.

Zauważmy, że odległość Ziemi od Słońca jest około 24 000 razy większa od promienia Ziemi. Ta zaskakująco duża liczba doskonale pokazuje, że

nawet w ramach samego tylko Układu Słonecznego cała Ziemia, a co dopiero pojedyncza istota ludzka, naprawdę jest „pochłonięta jak punkt”.

Jeśli świadomość tego faktu kogoś niepokoi, to uprzedzam, że za chwilę będzie jeszcze gorzej. Dopiero zaczęliśmy się wspinać po drabinie kosmicznych odległości.

Znając rozmiar ziemskiej orbity wokół Słońca, możemy wykorzystać jej wielkość do wyznaczenia odległości do kilku względnie bliskich gwiazd w sposób bezpośredni, z użyciem geometrii euklidesowej. Gwiazdy te są na tyle blisko, że ich położenie na niebie zmienia się zauważalnie w ciągu roku w wyniku tego, że Ziemia krąży wokół Słońca. Jest to tak zwane zjawisko paralaksy. Natura wyposażyła nas w dwoje oczu i instynktownie wykorzystujemy efekt paralaksy do szacowania odległości do dużo bliższych obiektów, ponieważ w ich przypadku każde z naszych oczu widzi je pod nieco innym kątem. Uczeni prowadzący badania za pomocą satelity Hipparcos, działającego w latach 1989–1993, zastosowali zjawisko paralaksy do sporządzenia katalogu odległości do około 100 000 (względnie) bliskich gwiazd.

Najbliższa Słońca gwiazda, Proxima Centauri, znajduje się w odległości nieco ponad czterech lat świetlnych. Ma jeszcze dwie bliskie towarzyszki. Gwiazdę Barnarda, kolejną pod względem odległości niezależną gwiazdę, dzieli od nas około sześciu lat świetlnych. Nawiązanie łączności z (hipotetycznymi) kosmitami mieszkającymi w jednym z tych układów – lub z cyborgami wysłanymi tam w przyszłości w roli osadników – będzie wymagało ogromnej cierpliwości.

W porównaniu z przestrzenią międzygwiazdową Układ Słoneczny wydaje się bardzo przytulnym zakątkiem. Odległość Słońca od Proximy Centauri jest około pół miliona razy większa od odległości Ziemi od Słońca.

Kluczowa technika pozwalająca rozciągać drabinę kosmicznych odległości jeszcze dalej w głąb kosmosu wykorzystuje wspomniany już wcześniej fakt, że gdziekolwiek spoglądamy, wszędzie dostrzegamy takie same obiekty i substancje. Gdyby udało nam się wyróżnić pewną klasę obiektów charakteryzujących się tym, że wszystkie świecą z taką samą jasnością, to moglibyśmy ich użyć w roli „świec standardowych”. W takim wypadku wystarczyłoby znać odległość do jednego obiektu z grupy świec standardowych, by móc określić, jak daleko znajdują się inne obiekty tego typu – przeprowadzenie pomiaru polegałoby na zwyczajnym porównaniu

ich jasności. Jeśli na przykład jakieś źródło tego typu znajduje się w dwukrotnie większej odległości, to będzie się nam *wydawało,* że jego jasność jest czterokrotnie mniejsza.

W tym miejscu należy sobie postawić pytanie, jak uzyskać pewność, że obiekty obserwowane w różnych odległych miejscach miałyby taką samą jasność, gdybyśmy oglądali je z bliska. Cała ta idea zasadza się na pomyśle, że musimy znaleźć jakieś klasy obiektów o wielu jednakowych własnościach, założyć, że mamy rację, a potem sprawdzić, czy uzyskujemy zgodne wyniki. Rozważmy prosty przykład, który pozwoli nam zilustrować tę podstawową ideę i pokazać pułapki, jakie czyhają na badaczy.

Gwiazdy w ogólnym przypadku są zbyt różnorodne, by można je było wykorzystać w roli świec standardowych. Rozpalony do białości Syriusz A jest około dwudziestu pięciu razy jaśniejszy od Słońca, natomiast jasność jego bliskiego towarzysza, Syriusza B, który jest karłem, jest około czterdziestu razy mniejsza, mimo iż obie gwiazdy znajdują się mniej więcej w takiej samej odległości od Ziemi (z astronomicznego punktu widzenia). Aby uzyskać dużo lepsze wyniki pomiarów, powinniśmy się ograniczyć do porównywania gwiazd o takiej samej barwie czy też raczej, mówiąc ściślej, gwiazd emitujących światło o takim samym widmie elektromagnetycznym[5]. Możemy mieć uzasadnioną nadzieję, że jeśli porównamy ze sobą takie jednakowo wyglądające gwiazdy, to różnice w ich jasności będą wynikały z różnicy w ich odległości. Taki wniosek wynika z fizycznej teorii gwiazd, która wyjaśnia, jak powstaje wiele charakterystycznych cech tych obiektów. Ale jak to sprawdzić? Jeden ze sposobów polega na znalezieniu zwartej grupy zawierającej wiele gwiazd położonych blisko siebie. Doskonale nadaje się do tego gromada znana jako Hiady, która zawiera setki gwiazd. Jeśli gwiazdy o bardzo podobnym widmie mają bardzo zbliżoną jasność, to dwie takie gwiazdy znajdujące się w tej samej gromadzie powinny się nam wydać jednakowo jasne. I właśnie taką podstawową prawidłowość udało się nam stwierdzić.

Astronomowie muszą brać pod uwagę jeszcze kilka innych komplikacji, takich jak wpływ pyłu międzygwiazdowego. Pył pochłania światło i w związku z tym może powodować, że obserwowane obiekty wydają się dalsze, niż faktycznie są. Mam nadzieję, że moi koledzy wybaczą mi, iż prześlizgnąłem się tu nad tym zagadnieniem i innymi szczegółami

technicznymi, ale zjawiska te w niczym nie zmieniają naszej myśli przewodniej.

Wykorzystując różnorodne świece standardowe, możemy rozciągnąć drabinę kosmicznych odległości jeszcze dalej i „wspiąć się” od pobliskich obiektów do granic obserwowalnego Wszechświata. Niektóre rodzaje świec standardowych lepiej się sprawdzają w odniesieniu do bliskich obiektów, a inne dają lepsze wyniki, gdy obserwujemy bardzo odległe ciała niebieskie. Zawsze musimy się jednak upewnić, że uzyskiwane wyniki są zgodne.

Wspomniany wcześniej katalog sporządzony przez uczonych prowadzących badania za pomocą satelity Hipparcos daje nam solidne oparcie, dzięki któremu możemy wykonać kolejny krok na drabinie kosmicznych odległości. Skoro przekonaliśmy się, że podobne gwiazdy mają taką samą jasność, możemy wykorzystać tę wiedzę, by wyznaczyć odległość do odleglejszych gromad, które znajdują się tak daleko, iż zjawisko paralaksy jest w ich przypadku niezauważalne.

W ten sposób da się wykonać pomiary w całej Drodze Mlecznej. Dzięki takim badaniom okazało się, że gwiazdy w naszej Galaktyce tworzą dość płaski dysk ze zgrubieniem w środku. Udało się też ustalić, że średnica Drogi Mlecznej wynosi około 100 000 lat świetlnych.

Szczególną grupę gwiazd tworzą cefeidy, które świecą jasnym pulsującym światłem. Badając uważnie takie gwiazdy w Obłokach Magellana[6], Henrietta Leavitt (1868–1921) ustaliła, że wszystkie cefeidy pulsujące z jednakową częstością mają taką samą jasność, co oznacza, że nadają się do roli świec standardowych. Można je dość łatwo zauważyć, ponieważ są nadzwyczaj jasne, a oprócz tego ich światło zmienia się w charakterystyczny sposób. Dzięki wykorzystaniu cefeid jako świec standardowych astronomom udało się zmierzyć odległości do wielu galaktyk.

Galaktyki są rozmieszczone nieregularnie, nie można więc podać jakiejś konkretnej wartości odległości między nimi. Potrafimy jednak obliczyć średnią odległość między przeciętną galaktyką i jej najbliższą dużą sąsiadką. Okazuje się, że taka typowa międzygalaktyczna odległość wynosi kilkaset tysięcy lat świetlnych. W przeciwieństwie do gwiazd i planet, które niemal zawsze są oddalone od swoich sąsiadek na odległości wielokrotnie

przekraczające ich rozmiar, przeciętny dystans między galaktykami nie jest dużo większy od ich średnicy.

W królestwie galaktyk udało nam się znaleźć jeszcze kilka innych użytecznych świec standardowych i odkryć wiele interesujących szczegółów ich struktury. Dzięki tym badaniom astronomicznym nakreślony do tej pory obraz zyskuje głębię i nasz podstawowy wniosek jeszcze bardziej się umacnia. Ponieważ jednak celem tej książki jest wyjaśnienie podstaw, a nie przedstawienie encyklopedycznego kompendium wiedzy, przejdźmy od razu, bez zbędnych ceregieli, do omówienia najdalszych zakątków Wszechświata.

*Kosmiczny horyzont*

Prowadząc pionierskie badania odległych galaktyk z wykorzystaniem cefeid jako najważniejszych świec standardowych, Edwin Hubble (1889–1953) odkrył nowe zjawisko o podstawowym znaczeniu i daleko idących konsekwencjach. Zauważył mianowicie, że wzory światła gwiazd dobiegającego z odległych galaktyk – ich widma – są przesunięte w kierunku większych długości fali, jeśli porówna się je z wzorami światła z bliższych galaktyk. Zjawisko to jest znane jako przesunięcie ku czerwieni. Nazwa ta odwołuje się do faktu, że jeśli zwiększymy systematycznie wszystkie długości fal światła tworzącego tęczę, to kolory poszczególnych pasków zaczną się zmieniać. Barwy po niebieskiej stronie tęczy przesuną się w kierunku jej czerwonego krańca. Efekt ten zachodzi również dalej, poza zakresem światła widzialnego. W miejscu, gdzie wcześniej był pasek nadfioletowy, pojawia się „nowy” niebieski pasek, a czerwona smuga z drugiej strony znika, zmieniając się w podczerwień.

Zauważone przez Hubble’a przesunięcie ku czerwieni można wytłumaczyć w przekonujący sposób i to wyjaśnienie całkowicie zrewolucjonizowało nasz obraz Wszechświata. Interpretacja, o której tu mowa, bazuje na prostym, ale interesującym efekcie opisanym po raz pierwszy przez Christiana Dopplera w 1842 roku. Doppler zwrócił mianowicie uwagę na fakt, że jeśli jakieś źródło fal oddala się od nas, to kolejne wierzchołki wysyłanych przez nie fal będą do nas docierały z coraz odleglejszych miejsc i w związku z tym odbierana przez nas fala ulegnie rozciągnięciu. Innymi słowy, obserwowane fale ulegają w takiej sytuacji

przesunięciu i mają większą długość niż w przypadku, gdyby to samo źródło było nieruchome. Najprostsze wyjaśnienie wykrytego przez Hubble'a przesunięcia ku czerwieni jest więc takie, że galaktyki się od nas oddalają.

Hubble odkrył też w zmierzonych przesunięciach ku czerwieni zaskakująco prostą prawidłowość, która przejawia się tym, że im dalej znajduje się dana galaktyka, tym większe jest jej przesunięcie ku czerwieni. Mówiąc dokładniej, Hubble zauważył, że wielkość przesunięcia ku czerwieni jest proporcjonalna do odległości. To oznacza, że *dalekie galaktyki oddalają się od nas z prędkościami proporcjonalnymi do ich odległości*.

Jeśli wyobrazimy sobie, że odwracamy ruch galaktyk, tak by odtworzyć przeszłość, to stwierdzona przez Hubble'a proporcjonalność nabierze zupełnie nowego, wstrząsającego znaczenia. W wyniku takiego odwróconego przepływu dalsze galaktyki będą się zbliżały znacznie szybciej, pokonując dzielącą je od nas odległość w taki sposób, że *wszystkie zbiegną się jednocześnie w jednym miejscu*. Możemy zatem podejrzewać, że w przeszłości cała materia Wszechświata była upakowana znacznie ciaśniej niż obecnie. Jeśli włączymy ponownie właściwy kierunek upływu czasu, to ujrzymy zjawisko wyglądające jak kosmiczny wybuch.

Czy to możliwe, że Wszechświat wyłonił się z wybuchu? Gdy jezuita Georges Lemaître po raz pierwszy zaproponował takie wyjaśnienie obserwacji Hubble'a, jego koncepcja „Wielkiego Wybuchu" wydawała się śmiałą i piękną ideą, ale niewiele było dowodów przemawiających za jej poprawnością i propozycja ta nie miała solidnego oparcia w podstawach fizyki[7]. (Sam Lemaître używał określeń „pierwotny atom" lub „kosmiczne jajo". Mniej poetycka nazwa „Wielki Wybuch" pojawiła się znacznie później). Dalsze badania pozwoliły nam jednak o wiele lepiej zrozumieć zachowanie materii w ekstremalnych warunkach. Obecnie mamy wiele dowodów, które jednoznacznie potwierdzają poprawność koncepcji Wielkiego Wybuchu. W rozdziale 6 zajmiemy się bardziej szczegółowo historią kosmosu i wtedy też przyjrzymy się tym dowodom.

Na razie, aby zakończyć naszą opowieść o pomiarach kosmosu, wykorzystamy scenariusz Wielkiego Wybuchu do zdefiniowania granicy i rozmiaru obserwowalnego Wszechświata. Jeśli wyobrazimy sobie, że odtwarzamy do tyłu film przedstawiający kosmiczną historię, to dojdziemy

do wniosku, że w pewnym określonym momencie zobaczymy, jak wszystkie galaktyki spotykają się w jednym miejscu. Kiedy to nastąpiło? Aby obliczyć, ile czasu upłynęło od tej chwili, musimy po prostu podzielić odległość przebytą przez jedną z galaktyk przez prędkość, z jaką się porusza. (Ponieważ, jak wynika z obserwacji Hubble'a, prędkość galaktyk jest proporcjonalna do ich odległości, otrzymamy taki sam wynik bez względu na to, którą galaktykę wybierzemy). Przeprowadzając takie oszacowanie, dojdziemy do wniosku, że wszystkie galaktyki musiały wpaść na siebie jakieś 20 miliardów lat temu. Wykonując trochę dokładniejsze obliczenia, uwzględniające zmianę prędkości w czasie wynikającą z wpływu grawitacji, uzyskamy nieco mniejszą wartość. Z najlepszych współczesnych oszacowań wynika, że Wielki Wybuch nastąpił 13,8 miliarda lat temu.

Spoglądając na obiekty znajdujące się daleko w kosmosie, oglądamy ich przeszłość. Ponieważ światło przemieszcza się ze skończoną prędkością, docierające do nas obecnie promienie światła odległych obiektów musiały być wysłane bardzo dawno temu. Gdy spoglądamy około 13,8 miliarda lat wstecz, cofając się do samego Wielkiego Wybuchu, docieramy do granic możliwości naszego wzroku. Zostajemy „oślepieni światłem". Początkowy kosmiczny wybuch był tak jasny, że nie możemy zobaczyć niczego, co jest poza nim. (A przynajmniej nikt nie wie, jak można by tego dokonać).

Ponieważ nie możemy zajrzeć poza określoną chwilę w czasie, nie możemy też sięgnąć wzrokiem dalej niż do pewnej określonej odległości, jaką światło mogło przebyć w tym ograniczonym czasie. Bez względu na to, jak wielki jest „naprawdę" Wszechświat, wszechświat *widoczny* obecnie (czyli Wszechświat obserwowalny) jest skończony.

Jaki jest jego rozmiar? Szukając odpowiedzi na to pytanie, możemy w pełni docenić pomysłowość idei mierzenia odległości w latach świetlnych. Ponieważ graniczny czas wynosi 13,8 miliarda lat, to graniczna odległość musi być równa… 13,8 miliarda lat świetlnych! Aby uzmysłowić sobie tę ogromną wartość, przypomnijmy, że promień Ziemi wynosi około jednej miliardowej roku świetlnego.

Tym zestawieniem skrajnie różnych wartości kończymy naszą opowieść o mierzeniu kosmosu. Świat jest ogromny. Jest w nim mnóstwo miejsca dla ludzkości, by mogła się swobodnie rozwijać, a oprócz tego pozostaje jeszcze mnóstwo przestrzeni, którą możemy podziwiać z daleka.

# WEWNĘTRZNA OBFITOŚĆ: CO WIEMY I JAK SIĘ TEGO DOWIEDZIELIŚMY

Teraz popatrzmy do środka. Również tam odkryjemy prawdziwą obfitość. Po raz kolejny przekonamy się, że mamy mnóstwo przestrzeni do wykorzystania i jeszcze więcej do podziwiania.

Dzięki różnym rodzajom mikroskopów możemy oglądać prawdziwe bogactwo kryjące się w małych rzeczach. Mikroskopia jest obszerną dziedziną wiedzy, pełną pomysłowych i użytecznych idei, ale tutaj zdołamy jedynie omówić pobieżnie cztery podstawowe techniki, dzięki którym potrafimy zaglądać na różne poziomy głębokiej struktury materii.

Najprostsze i najbardziej znane mikroskopy wykorzystują zdolność szkła i innych przezroczystych substancji do zakrzywiania światła. Formując ze szkła soczewki i umieszczając je w strategicznych miejscach, możemy zakrzywiać wiązkę światła w taki sposób, by kąty, pod jakimi poszczególne promienie docierają do siatkówki oka lub czujnika kamery, zostały rozciągnięte. Sprawia to, że obraz docierający do oka wydaje się większy. Ta sztuczka pozwala nam w cudownie użyteczny i uniwersalny sposób badać świat na odległościach sięgających około jednej milionowej metra, a nawet jeszcze trochę mniejszych. Dzięki temu możemy oglądać komórki tworzące rośliny, zwierzęta i ludzi. Możemy się przyglądać skupiskom bakterii, które czasem nam pomagają, a czasem wywołują choroby.

Jeśli jednak za pomocą tej techniki zakrzywiania światła będziemy chcieli oglądać jeszcze mniejsze obiekty, natrafimy na pewien podstawowy problem. Metoda ta opiera się na zmianie biegu promieni światła. Kłopot polega jednak na tym, że koncepcja światła jako wiązki promieni jest poprawna tylko w przybliżeniu, ponieważ tak naprawdę światło składa się z fal. Próbę użycia fal do wykrycia szczegółów, które są mniejsze od rozmiaru samych fal, można porównać do zbierania małych szklanych kulek w rękawicach bokserskich. Fale wchodzące w zakres światła widzialnego mają długość około połowy jednej milionowej metra, zatem w mikroskopach wykorzystujących światło widzialne poniżej tej odległości obraz robi się zamazany.

Długość fali promieni rentgenowskich jest od stu do tysiąca razy mniejsza niż w przypadku światła widzialnego, za ich pomocą więc można by

w zasadzie uzyskać dostęp do dużo mniejszych odległości. Jednak w przypadku promieniowania rentgenowskiego nie istnieje żadna substancja, która odgrywałaby taką samą rolę jak szkło dla światła. Nie ma żadnego materiału, z którego moglibyśmy uformować soczewki zakrzywiające promienie Röntgena. Bez soczewek klasyczna technika powiększania obrazów nie ma racji bytu.

Na szczęście istnieje zupełnie inne podejście, które doskonale się sprawdza. Technika ta opiera się na wykorzystaniu zjawiska dyfrakcji promieni rentgenowskich. Do zaobserwowania tego efektu nie są potrzebne żadne soczewki. Wystarczy skierować wiązkę promieni rentgenowskich na interesujący nas obiekt, pozwolić, by się na nim ugięła i rozproszyła, a następnie zarejestrować efekt końcowy tych oddziaływań. (Aby uniknąć nieporozumień, podkreślmy, że nie ma to nic wspólnego z lepiej znanym, prostszym rodzajem zdjęć rentgenowskich, które wykonuje się w przychodniach lekarskich i dentystycznych. Tradycyjne zdjęcia rentgenowskie są zwyczajnym rzutowaniem obrazu – zapisem cienia rzucanego w świetle rentgenowskim. Technika dyfrakcji promieni rentgenowskich polega na zastosowaniu starannie dobranych wiązek, którymi bada się o wiele mniejsze próbki). „Zdjęcia” wykonywane aparatem do dyfrakcji promieni rentgenowskich w niczym nie przypominają oglądanego obiektu. Zawierają wiele informacji opisujących jego kształt, ale w zakodowanej postaci.

Za tym prostym słówkiem „wiele” kryje się długa i fascynująca opowieść, w której pojawia się niejedna Nagroda Nobla. Niestety, wzory uzyskiwane techniką dyfrakcji promieni rentgenowskich nie zawierają wystarczająco dużo informacji, by można było odtworzyć badany obiekt, wykonując jedynie obliczenia matematyczne. Tak uzyskane „fotografie” można porównać do uszkodzonych plików z cyfrowymi zdjęciami.

Aby rozwiązać ten problem, uczeni na przestrzeni kilku pokoleń skonstruowali swoistą *drabinę interpretacyjną*, która pozwala im się wspiąć od prostych do bardziej skomplikowanych obiektów. Pierwszymi obiektami, jakie udało się odszyfrować na podstawie wzoru dyfrakcji rentgenowskiej, były proste kryształy, takie jak kryształ zwyczajnej soli kuchennej. Dzięki badaniom chemicznym uczeni w tym przypadku mieli dość dobre wyobrażenie, jak powinno wyglądać poprawne rozwiązanie, a mianowicie spodziewali się, że będzie to regularna siatka zbudowana

z jednakowej liczby dwóch rodzajów atomów, sodu i chloru. Mieli również powody, by podejrzewać – z uwagi na kształt dużych kryształów soli – że siatka ta będzie miała formę sześcianu. Nie wiedzieli tylko, jaka jest odległość między atomami. Na szczęście potrafili obliczyć, jak powinien wyglądać wzór dyfrakcyjny promieni rentgenowskich dla modelu takiego kryształu przy dowolnej zadanej odległości między atomami. Gdy udało im się dopasować wyniki takich obliczeń do zaobserwowanych wzorów, uzyskali potwierdzenie poprawności przyjętego modelu i jednocześnie wyznaczyli odległość między atomami w rzeczywistych kryształach.

Przygotowując się do badania bardziej skomplikowanych materiałów, badacze zastosowali przemyślną procedurę kroków pośrednich. Na każdym etapie wykorzystywali sprawdzone wcześniej wyniki do skonstruowania jeszcze bardziej skomplikowanych modeli, które powinny opisywać materiały o bardziej złożonej strukturze przestrzennej. Potem porównywali teoretyczne wzory dyfrakcji rentgenowskiej uzyskane po wykonaniu obliczeń z wykorzystaniem takiego proponowanego modelu z rzeczywistymi obrazami otrzymanymi w laboratorium. Dzięki zastosowaniu takiej techniki polegającej na zgadywaniu i żmudnych obliczeniach od czasu do czasu udawało im się trafić w dziesiątkę. Z każdym sukcesem pojawiały się nowe cechy strukturalne, które można było wykorzystać jako wkład do konstrukcji modeli następnej generacji.

Do wspaniałych osiągnięć w tej dziedzinie badań należy odkrycie przez chemiczkę Dorothy Crowfoot Hodgkin trójwymiarowej struktury cholesterolu (1937), penicyliny (1946), witaminy $B_{12}$ (1956) i insuliny (1969), a także opisanie trójwymiarowej struktury DNA (1953) – słynnej podwójnej helisy – przez Francisa Cricka i Jamesa Watsona, którzy rozszyfrowali zdjęcia dyfrakcji rentgenowskiej wykonane przez Maurice’a Wilkinsa i Rosalind Franklin.

Obecnie mamy do dyspozycji o wiele bardziej zaawansowane komputery i dzięki programom wykorzystującym owoce pracy poprzednich pokoleń chemicy i biolodzy mogą bez większych trudności odczytywać jeszcze bardziej skomplikowane wzory dyfrakcji rentgenowskiej. W ten sposób udało nam się określić strukturę dziesiątków tysięcy białek i innych ważnych cząsteczek organicznych. Sztuka wykonywania i interpretacji

użytecznych z naukowego punktu widzenia obrazów pozostaje kluczowym obszarem rozwoju biologii i medycyny.

Moim zdaniem opisana tu technika drabiny interpretacyjnej jest pięknym przykładem i metaforą tego, jak w ogólnym przypadku konstruujemy różne modele świata. Posługując się wzrokiem, musimy przekształcać dwuwymiarowe obrazy powstające na siatkówce oka w użyteczne wyobrażenie trójwymiarowego świata obiektów rozmieszczonych w przestrzeni. Z teoretycznego punktu widzenia jest to zadanie niemożliwe do wykonania, ponieważ po prostu mamy za mało informacji. Aby temu zaradzić, przyjmujemy założenia odnośnie do tego, jak działa świat. Analizując docierające do naszych oczu obrazy, wykorzystujemy nagłe zmiany barwy, cienie i ruch, by wykryć poszczególne obiekty, ich własności, zachowanie i odległość.

Małe dzieci i osoby niewidome, które nagle odzyskały wzrok, muszą się uczyć, jak oglądać świat. Uczą się metodą prób i błędów, wykorzystując wszystko, co już udało im się wcześniej ustalić, by z prostych przypadków skonstruować świat, który będzie miał jakiś sens. Nauka „widzenia” obiektów we wzorach dyfrakcji rentgenowskiej była zbiorowym wysiłkiem mającym na celu skonstruowanie czegoś podobnego. Uczeni musieli skompletować odpowiednio bogaty zestaw sztuczek, który pozwolił im zrozumieć świat.

Trzecia technika, mikroskopia skaningowa, jest na szczęście bardziej bezpośrednia. Polega na umieszczeniu igły z cienkim czubkiem blisko interesującego nas materiału i „przeglądaniu” go przez przesuwanie igły równolegle do jego powierzchni. Jeśli wykonamy takie skanowanie w polu elektrycznym, to między badaną powierzchnią i igłą popłynie prąd. Im mniejsza będzie odległość między czubkiem igły i powierzchnią, tym większy będzie strumień prądu. W ten sposób możemy określić topografię badanej powierzchni z dokładnością do pojedynczych atomów. Na ilustracjach pokazujących zebrane w ten sposób dane zobaczymy pojedyncze atomy wystające niczym góry z płaskiej równiny.

Na zakończenie powiedzmy jeszcze, jak naukowcy badają najmniejsze odległości. Pierwsze doświadczenie, którego celem było zajrzenie *do środka* atomów, przeprowadzili w 1913 roku dwaj fizycy, Hans Geiger i Ernest Marsden, pracujący pod kierunkiem Ernesta Rutherforda. W swoim doświadczeniu Geiger i Marsden skierowali wiązkę cząstek alfa na złotą

folię. Niektóre z cząstek odbijały się od powierzchni folii i badacze postanowili policzyć, ile z nich odbija się pod poszczególnymi kątami. Przed wykonaniem doświadczenia spodziewali się, że tylko nieliczne cząstki, jeśli w ogóle, ulegną odchyleniu o duży kąt. Cząstki alfa mają dużą bezwładność, więc tylko zderzenia ze znacznie masywniejszymi obiektami mogły w istotny sposób zmienić trajektorię ich ruchu. Gdyby cała masa złotej folii była rozłożona równomiernie, to do takich dużych odchyleń w ogóle nie powinno dojść.

Badacze zaobserwowali jednak coś zupełnie innego, niż się spodziewali. Okazało się, że w rzeczywistości duża liczba cząstek uległa odchyleniu o znaczny kąt. Od czasu do czasu pojedyncze cząstki alfa nawet całkowicie zawracały do miejsca, z którego je wysłano. Rutherford tak później opisywał swoją reakcję na to odkrycie:

> Było to najbardziej nieprawdopodobne zdarzenie w moim życiu. To było niemal tak niewiarygodne, jakbyś wystrzelił piętnastocalowy pocisk w kawałek papierowej bibułki, a pocisk odbił się i trafił w ciebie. Po zastanowieniu zrozumiałem, że rozproszenie wstecz musi być wynikiem jakiegoś pojedynczego zderzenia, a kiedy przeprowadziłem obliczenia, stwierdziłem, że nie można uzyskać takiego efektu, jeżeli się nie założy, że główna część masy atomu jest skupiona w maleńkim jądrze. Właśnie wtedy wpadłem na pomysł atomu z maleńkim masywnym jądrem obdarzonym ładunkiem […][8].

Przeprowadzona przez Rutherforda szczegółowa analiza wyników doświadczenia Geigera i Marsdena była podstawą do skonstruowania pierwszego nowoczesnego wyobrażenia atomu. Rutherford udowodnił, że jeśli chcemy wyjaśnić zebrane dane, to musimy przyjąć, iż masa i cały ładunek dodatni atomu są skoncentrowane w niewielkim jądrze. Jądro atomowe zawiera ponad 99 procent masy atomu, a mimo to obejmuje obszar o promieniu wynoszącym niecałą jedną stutysięczną promienia atomu i – ponieważ jest niemal doskonale kuliste – zajmuje mniej niż jedną dziesięciobilionową procent jego objętości. To są dosłownie astronomiczne liczby. Ogromną dysproporcję między rozmiarem jądra i całego atomu

można porównać do tego, jak bardzo znikomy jest rozmiar Słońca wobec otaczającej je przestrzeni międzygwiazdowej.

Doświadczenie Geigera i Marsdena stało się wzorem dla kolejnych uczonych zainteresowanych światem subatomowym i taki sposób wykonywania eksperymentów całkowicie zdominował prace badawcze mające na celu poznanie podstawowych oddziaływań. Bombardując różne cele cząstkami o coraz większej energii, a następnie analizując zmianę ich trajektorii, próbujemy się dowiedzieć jak najwięcej o strukturze wewnętrznej badanych obiektów. Również w tym wypadku tworzymy swoistą drabinę interpretacyjną, wykorzystując wszystko, czego udaje nam się dowiedzieć na każdym etapie, do zaplanowania i wyjaśnienia nowych doświadczeń, które pozwalają zajrzeć jeszcze głębiej.

## PRZYSZŁOŚĆ PRZESTRZENI

### *Poza horyzont*

Nie możemy zajrzeć dalej, niż wynosi odległość, jaką światło zdążyło pokonać od chwili Wielkiego Wybuchu. To ograniczenie wyznacza nasz kosmiczny horyzont. Jednak z każdym mijającym dniem Wielki Wybuch odchodzi coraz dalej w przeszłość. Przestrzeń, która jeszcze wczoraj znajdowała się poza naszym horyzontem, dzisiaj jest już w środku i możemy ją oglądać.

Oczywiście dodanie kolejnego dnia, a nawet tysięcy lat zwiększa wiek Wszechświata tylko o niewielki ułamek, tak nieznaczny wzrost obserwowalnego Wszechświata jest więc praktycznie niezauważalny w skali czasu życia pojedynczego człowieka. Możemy się jednak zastanawiać, jaki rodzaj Wszechświata będą mogli oglądać nasi odlegli potomkowie, i zgadywać, co może się dziać poza horyzontem. Alfred Tennyson wkłada w usta Ulissesa następujące słowa:

> Stałem się częścią tego, co poznałem,
> Ale to wszystko jest mi tylko bramą,
> Za którą widać świat niezwędrowany,

Którego krańce w dal się zapadają,
Gdy w dal wędruję. Stanąć, nie iść dalej,
Nie błysnąć w czynie, rdzewieć jak miecz w pochwie –
Wstrętne[9].

Fakt rozszerzania się kosmicznego horyzontu rodzi wiele pytań. Na przykład czy w wyniku takiego procesu może dojść do tego, że w którymś momencie cały Wszechświat znajdzie się w środku? Jeśli przestrzeń jest skończona, to taka chwila kiedyś w końcu nastąpi. Pamiętajmy jednak, że skończona przestrzeń wcale nie musi mieć krawędzi. Przykładem skończonej powierzchni, która nie ma granicy, może być sfera, czyli powierzchnia kuli. Powierzchnie zwyczajnych kul są dwuwymiarowe. Choć trudno to sobie wyobrazić, matematycy potrafią bez najmniejszego trudu definiować trójwymiarowe przestrzenie, które – tak jak zwyczajne sfery – są skończone, a mimo to nie mają granic. Tego typu przestrzenie mogą opisywać kształt skończonego Wszechświata.

Obserwowalny Wszechświat jest nadzwyczaj jednorodny. Wszędzie zawiera takie same rodzaje materii, która zachowuje się zgodnie z takimi samymi prawami, jest zorganizowana w taki sam sposób i równomiernie rozmieszczona w całej przestrzeni. W kontekście rozszerzania się horyzontu pojawia się zatem pytanie, czy taki „uniwersalny” rozkład występuje również w tych częściach, których nie możemy jeszcze zobaczyć.

A może Wszechświat jest tak naprawdę „multiwszechświatem” zawierającym wiele różnych prawidłowości i praw? Najprostszym sposobem uzyskania jednoznacznej odpowiedzi na to pytanie byłoby zaobserwowanie niezwykłych zjawisk w jakichś odległych zakątkach kosmosu. Gdyby udało nam się coś takiego zobaczyć, zdobylibyśmy niezaprzeczalny dowód istnienia multiwszechświata. Jednak wiele faktów związanych z podstawowymi prawami i kosmologią sugeruje inną, dość smutną, ale całkowicie logiczną możliwość, że nawet jeśli znajdujemy się w multiwszechświecie, to jego „odmienne” części staną się widoczne dopiero w bardzo odległej przyszłości, gdy znajdą się wewnątrz rozszerzającego się horyzontu. Napisałem, że to jest smutna możliwość, ponieważ moim zdaniem posługiwanie się ideą, która mówi coś konkretnego o otaczającym nas świecie, przenosi nasze rozważania na

zupełnie inny poziom. Właśnie na tym polega magia nauki. Poza tym możliwość weryfikacji wygłaszanych stwierdzeń pozwala nam zachować uczciwość.

*Cząstki przestrzeni?*

Euklides zakładał, że możemy bez końca mierzyć coraz mniejsze odległości, wykorzystując do tego jeden tylko aparat pojęciowy. Nie miał pojęcia o istnieniu atomów, cząstek elementarnych czy mechaniki kwantowej. Obecnie mamy już lepsze wyobrażenie na ten temat. Wiemy, że gdy dzielimy materię na bardzo małe fragmenty, to wiele rzeczy ulega istotnej zmianie! Zwyczajna kropla wody, chociaż wydaje się ciągła i nieruchoma, dzieli się na atomy i jeszcze bardziej podstawowe składniki, które nieustannie drgają i tańczą w rytm mechaniki kwantowej.

Gdy dochodzimy do mierzenia odległości subatomowych, musimy sięgnąć po narzędzia, które w niczym nie przypominają sztywnych linijek. Skalowalne wersje takich przyrządów po prostu nie istnieją. Mimo to geometria euklidesowa ma się świetnie i odnosi triumfy nawet w równaniach opisujących najgłębsze podstawy. W równaniach tych cząstki elementarne (i związane z nimi pola) znajdują się w nieprzerwanym kontinuum, jednakowym we wszystkich swoich fragmentach, a mierzone w nim długości i kąty spełniają twierdzenie Pitagorasa, dokładnie tak, jak zakładał Euklides. O dziwo, uchodzi nam to na sucho. Przynajmniej na razie…

… ale zapewne nie będzie to trwało wiecznie. Z ogólnej teorii względności Einsteina wynika, że przestrzeń jest pewnym rodzajem substancji. Jest dynamicznym obiektem, który może się zakrzywiać i poruszać. W dalszych rozważaniach poznamy jeszcze wiele innych powodów, które każą nam uważać przestrzeń za substancję. Jak wynika z zasad mechaniki kwantowej, jeśli coś może się poruszyć, to w końcu się samo z siebie poruszy. Oznacza to, że odległość między dwoma punktami ulega fluktuacjom. Łącząc ogólną teorię względności z mechaniką kwantową, możemy obliczyć, że przestrzeń przypomina trzęsącą się galaretkę, która jest w nieustannym ruchu.

Teoria przewiduje, że gdy odległość między dwoma punktami nie jest zbyt mała, to takie kwantowe fluktuacje stanowią zaniedbywalnie drobny

ułamek samej odległości. Możemy więc je pominąć w praktycznych zastosowaniach i powrócić do dobrze znanej geometrii euklidesowej. Jeżeli jednak zechcemy skupić uwagę na odległościach mniejszych niż około $10^{-33}$ centymetra – ta mała odległość jest znana jako długość Plancka – to typowe fluktuacje odległości między dwoma punktami mogą być tak duże jak dzielący je dystans. W tym miejscu na myśl przychodzą mi dwa wersy z apokaliptycznej wizji Williama Butlera Yeatsa:

> …w odśrodkowym wirze;
> Czysta anarchia szaleje nad światem…[10].

Wijące się linijki i tańczące cyrkle podkopują podstawy euklidesowego podejścia do geometrii, a w ostatecznym rozrachunku osłabiają również fundamenty koncepcji Einsteina. Idei leżących u podstaw działania systemu GPS nie można przenieść na małe odległości, ponieważ orbity satelitów o rozmiarze długości Plancka są zaszumione i nieprzewidywalne. Co je zastąpi? Nikt nie jest w stanie tego stwierdzić. Nie mamy zbyt dużych nadziei, że uzyskamy jakąś podpowiedź z doświadczeń, ponieważ długość Plancka jest biliardy razy mniejsza od odległości, które potrafimy obserwować. Ja sam nie potrafię oprzeć się wrażeniu, iż czasoprzestrzeń nie różni się w żaden zasadniczy sposób od materii, którą udało nam się o wiele lepiej zrozumieć. Jeśli tak jest, to musi się ona składać z ogromnej liczby jednakowych elementów – „cząstek przestrzeni” – które nieustannie kontaktują się ze swoimi sąsiadkami, wymieniają się informacją, łączą się i dzielą, rodzą i giną.

2 Blaise Pascal, *Myśli*, myśl 348, przeł. Tadeusz Boy-Żeleński, Fundacja Nowoczesna Polska, wolnelektury.pl, s. 70 (dostęp: 26 stycznia 2021, przyp. tłum.).

3 Walt Whitman, *Pieśń o sobie*, przeł. Andrzej Szuba, Wydawnictwo Literackie, Kraków 1990, s. 99 (przyp. tłum.).

4 Blaise Pascal, *op.cit.* (przyp. tłum.).

5 Możemy ująć to bardziej poetycko: chodzi o gwiazdy tworzące takie same tęcze w zakresie promieniowania obejmującym całą ich jasność.

6 Oba Obłoki Magellana są niewielkimi galaktykami znajdującymi się w sąsiedztwie Drogi Mlecznej. Ponieważ są dobrze widoczne na południowej półkuli Ziemi, polinezyjscy

żeglarze kierowali się ich położeniem na niebie na długo przed Magellanem.

7 Najważniejsze prace teoretyczne Lemaître’a ukazały się jeszcze przed opublikowaniem przez Hubble’a wyników jego obserwacji.

8 Cyt. za: Richard Rhodes, *Jak powstała bomba atomowa*, przeł. Piotr Amsterdamski, Prószyński i S-ka, Warszawa 2000, s. 43 (przyp. tłum.).

9 Alfred Tennyson, *Ulisses* [w:] Alfred Tennyson, *Poezje wybrane*, przeł. Zygmunt Kubiak, Państwowy Instytut Wydawniczy, Warszawa 1970, s. 36–37 (przyp. tłum.).

10 William Butler Yeats, *Drugie przyjście*, przeł. Stanisław Barańczak [w:] William Butler Yeats, *Poezje wybrane*, Państwowy Instytut Wydawniczy, Warszawa 1987, s. 99 (przyp. tłum.).

# 2

# Istnieje mnóstwo czasu

## PRELUDIUM: POMIARY I ICH ZNACZENIE

Geniusz Franka Ramseya (1903–1930) rozbłysnął jasnym światłem, ale na krótko. Zanim zmarł w wieku dwudziestu sześciu lat z powodu problemów z wątrobą, wniósł ważny wkład w rozwój matematyki, ekonomii i filozofii. Mimo młodego wieku w latach dwudziestych był główną postacią życia intelektualnego w Cambridge. Współpracował i spierał się zarówno z Johnem Maynardem Keynesem, jak i Ludwigiem Wittgensteinem – pierwszy z nich jest obecnie uważany za największego brytyjskiego ekonomistę, a drugi za najwybitniejszego filozofa XX stulecia. „Teoria Ramseya” jest prężnie rozwijającą się, zabawną dziedziną matematyki, która zrodziła się dzięki jego pracom.

(Przytoczmy klasyczny już, intrygujący przykład, który pozwala się zorientować, czego dotyczy teoria Ramseya. Wyobraźmy sobie grupę sześciu osób, w której każda para albo za sobą przepada, albo szczerze się nienawidzi. Otóż, jak się okazuje, w każdej takiej grupie zawsze będzie istniał zbiór trzech osób, które albo się ze sobą przyjaźnią, albo serdecznie się nienawidzą).

Frank Ramsey jest myślicielem, z którym należy się liczyć. Wysunięte przez niego wątpliwości odnośnie do nadludzkich rozmiarów świata fizycznego zasługują na to, by je poważnie rozważyć:

> Mój obraz świata zachowuje perspektywę i w żadnym razie nie jest modelem sporządzonym z uwzględnieniem skali. Na pierwszym planie znajdują się w nim istoty ludzkie, a gwiazdy są małe jak

> trzypensówki. Nie wierzę tak naprawdę w astronomię i mogę ją najwyżej zaakceptować jako skomplikowany opis pewnego rodzaju wrażeń ludzi, a może i zwierząt. Swoją perspektywę stosuję nie tylko w odniesieniu do przestrzeni, lecz także czasu. Kiedyś świat wystygnie i wszystko zginie, ale od tej chwili dzieli nas jeszcze mnóstwo czasu i jej obecna wartość, po uwzględnieniu dyskonta składanego, jest niemal zerowa.

Słynna okładka jednego z numerów „New Yorkera” wyraża podobną myśl. Widać na niej „mapę świata”, na której większą część powierzchni zajmuje Manhattan, natomiast reszta planety jest poupychana po kątach, w gęsto upakowanym, schematycznie zaznaczonym tle.

Podejście Ramseya stanowi zdrowe antidotum na obsesyjne napawanie się wielkością kosmosu. Jednakowe objętości przestrzeni mają taką samą możliwość pomieszczenia materii i ruchu, ale to nie oznacza, że są tak samo ważne. Niezróżnicowane, puste obszary są mniej ciekawe. Podobnie równe odcinki czasu mogą pomieścić taką samą liczbę uderzeń zegara, ale to nie oznacza, że są tak samo istotne. Dla większości z nas najczęściej najważniejsze są zdarzenia bliskie nam w czasie. Takie podejście wyrabia się już w dzieciństwie jako część strategii radzenia sobie ze światem.

Jednak Ramsey, starając się podkreślić swój punkt widzenia, zapędził się chyba trochę za daleko. Nie przekonuje mnie, gdy mówi, że nie wierzy w astronomię. Moim zdaniem jego przemyślenia świadczą raczej o tym, że niewyobrażalny ogrom kosmicznej przestrzeni i czasu bardzo go przytłoczył, tak jak wcześniej Pascala. Niestety, odrzucając znaczenie tego faktu, pozbawił się również potencjalnego źródła inspiracji. Przegapił możliwość zostania nie tylko wielkim matematykiem, ekonomistą i filozofem, lecz także wybitnym kosmologiem.

Możemy stać na stanowisku, że istnieje ogromna obfitość zarówno „tam, na zewnątrz”, jak i „tu, w środku”. Jedno nie przeczy drugiemu i nie musimy wybierać tylko jednej z tych możliwości. Patrząc z różnych perspektyw, dostrzeżemy, że raz jesteśmy mali, a raz ogromni. Te dwa punkty widzenia ukazują ważną prawdę na temat naszego miejsca w porządku rzeczy. Aby osiągnąć pełne i realistyczne zrozumienie rzeczywistości, musimy uwzględnić je oba.

## OBFITOŚĆ CZASU

To, co ustaliliśmy w stosunku do przestrzeni, zachowuje ważność również w odniesieniu do czasu: jest go mnóstwo, zarówno na zewnątrz, jak i w środku. Choć ogrom kosmicznego czasu całkowicie nas przytłacza, w swoim wnętrzu również mamy go bardzo dużo.

W swojej wizjonerskiej opowieści kosmicznej *Starmaker* Olaf Stapledon, jeden z klasyków fantastyki naukowej, pisze: „Zatem cały okres istnienia ludzkości, z jej wieloma kolejnymi gatunkami i nieprzerwanym strumieniem pokoleń, jest tylko krótkim błyskiem w życiu kosmosu”. Rzymski filozof Seneka wyraził coś zupełnie przeciwnego w dialogu *O krótkości życia*. „Po co się użalamy na naturę? – pisze – Przecież łaskawie obeszła się z nami. Długie jest życie, jeżeli ktoś umie czynić z niego użytek”[11].

Jak się przekonamy, obaj mają rację.

## CZYM JEST CZAS?

Aby nie ugrzęznąć w mglistych, bezsensownych dywagacjach, zatrzymajmy się na chwilę, weźmy głęboki oddech i postawmy sobie bardzo podstawowe pytanie: czym jest czas?

Z psychologicznego punktu widzenia wydaje się on mniej namacalny niż przestrzeń. Nie możemy się przemieszczać swobodnie w czasie ani nawet powrócić do wybranej chwili. Gdy jakaś chwila mija, staje się przeszłością. Nie ma jej, potem jest, a zaraz potem znowu jej nie ma.

Święty Augustyn, który był wybitnym myślicielem, wyraził bliskie nam wszystkim uczucie zdumienia: „Czymże więc jest czas? Jeśli nikt mnie o to nie pyta, wiem. Jeśli pytającemu usiłuję wytłumaczyć, nie wiem”[12].

Einsteinowi często przypisuje się błyskotliwą, choć niepoważną odpowiedź na postawione tu pytanie, ale w rzeczywistości jej autorem jest twórca literatury fantastycznonaukowej Ray Cummings: „Czas jest tym, co nie pozwala, by wszystko działo się jednocześnie”.

Inna zwięzła odpowiedź, która początkowo może wydawać się żartem, brzmi: „czas jest tym, co odmierzają zegary”. Moim zdaniem właśnie to

stwierdzenie zawiera ziarno prawdy. Ta myśl posłuży nam za fundament do dalszych rozważań.

W przyrodzie występuje wiele zjawisk, które powtarzają się cyklicznie. Następstwo dni i nocy, fazy Księżyca, pory roku czy bicie serca ludzi i zwierząt – wszystko to są doskonale nam znane przykłady takich zjawisk. Jeśli zmierzymy czas między kolejnymi uderzeniami serca siedzącego spokojnie człowieka, to przekonamy się, że utrzymują one mniej więcej jednakowe tempo. Równie łatwo możemy sprawdzić, że każdy cykl faz Księżyca – każdy miesiąc księżycowy – zawiera niemal taką samą liczbę dni.

Z pozoru mogłoby się wydawać, że cykl pór roku jest nieco bardziej rozmyty, ale wynika to z kaprysów pogody. Aby móc jak najlepiej przewidywać następstwo pór roku, starożytne cywilizacje rozwijały coraz lepsze metody astronomicznego pomiaru czasu. Dawni uczeni wpadli na pomysł, że można w tym celu obserwować zmiany trajektorii Słońca na niebie – sprawdzać dzień po dniu, gdzie wschodzi, gdzie zachodzi i jak wysoko się unosi. Zmiany te są o wiele bardziej regularne niż zmiany pogodowe, które często bywają nieprzewidywalne. Dzięki obserwacjom Słońca udało się wprowadzić o wiele dokładniejszą i bardziej praktyczną definicję pór roku oraz jego długości. (Oficjalnie przyjmuje się, że pory roku są okresami między kolejnymi przesileniami – czyli dniami, w których Słońce dociera do najwyższego lub najniższego punktu na niebie – i momentami równonocy, a więc chwilami o najszybszej zmianie długości dnia. Podczas przesileń występuje największa różnica między długością dnia i nocy, natomiast w okresie równonocy długość dnia i nocy się wyrównuje. Rok jest odcinkiem czasu między kolejnymi pełnymi cyklami tak opisanych zmian). Przyjąwszy takie dokładne definicje, ludzie zauważyli, że każda pora roku zawiera taką samą liczbę dni lub miesięcy księżycowych. Opracowali więc kalendarze, które pomagały im w wielu ważnych aspektach życia, takich jak wybór odpowiedniej chwili na zasiew, zaplanowanie najlepszego momentu na żniwa, a w przypadku myśliwych przewidzenie kolejnej migracji zwierząt.

Krótko mówiąc, łatwo się przekonać, że bardzo często różne procesy cykliczne, fizjologiczne i astronomiczne są ze sobą zsynchronizowane, że maszerują w rytm bębna jednego i tego samego dobosza. Dzięki temu możemy wykorzystać dowolny z nich do mierzenia pozostałych[13].

Odkrycie, że istnieje wspólne, uniwersalne tempo upływu czasu, jest ważnym faktem charakteryzującym działanie fizycznego świata. Chcąc opisać to tempo, mówimy, że istnieje coś, co wykorzystują wszystkie te cykle, co podpowiada im, kiedy powinny się powtórzyć. Tym czymś, *z definicji*, jest czas. Czas jest doboszem, który wybija rytm kolejnych zmian.

Istotną rolę w życiu każdego człowieka odgrywają jeszcze dwa inne przejawy upływu czasu. Jednym z nich jest jego funkcja w muzyce. Wspólnie muzykując, tańcząc lub śpiewając, wychodzimy z założenia, że wszyscy uczestnicy zabawy będą ze sobą zsynchronizowani. Choć jest to doskonale znane nam doświadczenie i traktujemy je jak coś oczywistego, to jednak stanowi ono przekonujący dowód na to, że wszyscy mamy takie samo poczucie upływu czasu, i to z dużą dokładnością.

Inny przejaw upływu czasu, być może najważniejszy z punktu widzenia człowieka, ma związek z przebiegiem życia. Niemal wszystkie dzieci rozwijają się zgodnie z mniej więcej takim samym harmonogramem: zaczynają chodzić, mówić i zdobywać inne ważne umiejętności po upływie określonej liczby miesięcy (albo dni czy tygodni). Ludzie rosną, osiągają dojrzałość, rozwijają się i starzeją zgodnie z przewidywalnym wzorcem, ściśle związanym z liczbą przeżytych lat. Każdy z nas jest swoistym zegarem, choć dokładne odczytanie jego wskazania jest bardzo trudne.

Jak pokazuje przykład ludzkiego życia, czas decyduje o przebiegu nie tylko procesów cyklicznych, lecz także takich, które się nie powtarzają. Gdy w miarę rozwoju nauki ludzie zaczęli systematycznie badać ruch i inne przejawy zmian w świecie fizycznym, nieustannie przekonywali się – w każdym zbadanym do tej pory przypadku – że wszystkie zmiany zachodzą w jednakowym, wspólnym tempie. Zmiany położenia ciał niebieskich, przesunięcia obiektów w reakcji na pojawienie się sił, przebieg reakcji chemicznych, rozchodzenie się promieni światła w przestrzeni – wszystkie te procesy, i wiele innych, przebiegają w tempie wyznaczanym przez jeden upływ czasu.

Ujmując to inaczej, możemy powiedzieć, że istnieje pewna wielkość, zwykle oznaczana symbolem *t*, która występuje w podstawowym opisie procesu zachodzenia zmian w fizycznym świecie. Właśnie tę wielkość mamy na myśli, gdy pytamy: „Która jest teraz godzina?”. Właśnie *tym* jest

czas. Czas jest tym, co odmierzają zegary, a wszystko, co się zmienia, jest zegarem.

## CZAS HISTORYCZNY: CO WIEMY I JAK SIĘ TEGO DOWIEDZIELIŚMY

W poprzednim rozdziale przeprowadziliśmy już pomiar czasu kosmicznego, gdy mówiliśmy o Wielkim Wybuchu. Od tamtej chwili upłynęło 13,8 miliarda lat. W skali ludzkiego życia jest to niesłychanie długi czas. W tym okresie mogłyby przeżyć swoje życie setki milionów pokoleń.

Jest to liczba tak wielka, że nie mieści się w głowie – 13,8 miliarda lat – ale Wielki Wybuch nie ma większego wpływu na naszą codzienność. Aby uświadomić sobie obfitość czasu, powinniśmy rozważyć odległe wydarzenia, które mają bliższy związek z naszą historią. Bardzo długie okresy czasu można mierzyć na dwa sposoby: wykorzystując datowanie izotopowe albo astrofizykę. Omówmy po kolei obie te metody.

Technika datowania izotopowego bazuje na wykorzystaniu różnych izotopów pierwiastków promieniotwórczych. Chodzi o jądra atomowe zawierające jednakową liczbę protonów, ale różną liczbę neutronów. Takie jądra tworzą atomy, które są niemal identyczne pod względem własności chemicznych. Uczeni odkryli również, że wiele pierwiastków chemicznych jest niestabilnych. Jądra atomowe takich pierwiastków ulegają rozpadowi po upływie pewnego charakterystycznego czasu. Często izotopy jednego pierwiastka chemicznego mają diametralnie różne czasy rozpadu. Właśnie te dwie cechy – jednakowe własności chemiczne i różne czasy rozpadu – decydują o tym, że możemy stosować metodę datowania izotopowego.

Aby nie być gołosłownym, przedstawię jeden ważny przykład datowania izotopowego, w którym wykorzystuje się atomy węgla. Najczęściej spotykanym izotopem węgla jest $^{12}C$ („węgiel-12”), który zawiera sześć protonów i sześć neutronów. Jądra $^{12}C$ są bardzo trwałe. Istnieje jednak również inny często występujący izotop tego pierwiastka, $^{14}C$ („węgiel-14”), który jest niestabilny, czyli „promieniotwórczy”.

Czas połowicznego rozpadu izotopu $^{14}C$ wynosi około 5730 lat, co oznacza, że jeśli będziemy mieli próbkę materiału zawierającego atomy $^{14}C$, to po upływie 5730 lat połowa z nich przestanie istnieć. Rozpadające się jądra $^{14}C$ przekształcają się w jądra azotu ($^{14}N$) i emitują przy tym elektrony i antyneutrina. W dalszej części książki omówimy tego rodzaju procesy związane z promieniotwórczością i oddziaływaniem słabym bardziej szczegółowo. Na razie wystarczy, jeśli zatrzymamy się na takim ogólniejszym poziomie.

Oczywiście nie musimy czekać 5730 lat, by to sprawdzić. Ponieważ nawet niewielka próbka substancji organicznej zawiera dużo atomów węgla, możemy wykryć wiele rozpadów również w krótszych przedziałach czasu. Mierząc liczbę elektronów emitowanych przez taką substancję, przekonamy się, że w równych odstępach czasu dochodzi do rozpadu jednakowego ułamka jąder $^{14}C$, które wciąż jeszcze w niej pozostają.

Ponieważ Wszechświat jest o wiele starszy niż 5730 lat, rodzi się pytanie, dlaczego w ogóle zostały w nim jeszcze jakieś atomy $^{14}C$. Kluczowe znaczenie ma w tym wypadku fakt, że za sprawą oddziaływania promieni kosmicznych w ziemskiej atmosferze nieustannie powstają nowe jądra $^{14}C$. Taki proces równoważy utratę tych atomów w wyniku rozpadu i pozwala utrzymać stały stosunek izotopów $^{14}C$ do $^{12}C$ w atmosferze.

Organizmy żywe pobierają węgiel albo bezpośrednio z atmosfery, albo niedługo po rozpuszczeniu się atmosferycznych związków węgla w wodzie. Atomy węgla wchłaniane przez istoty żywe zachowują więc aktualną proporcję izotopów $^{14}C/^{12}C$ w atmosferze. Gdy już jednak węgiel zostanie wbudowany w cząsteczki tworzące tkanki zwierząt i roślin, rozpadające się jądra $^{14}C$ nie są wymieniane. Od tej chwili zawartość tego izotopu maleje z czasem w określony, przewidywalny sposób. Zatem mierząc stosunek jąder $^{14}C$ do $^{12}C$ w próbce substancji organicznej, możemy określić, kiedy organizm będący źródłem tej próbki żył na Ziemi i pobierał węgiel.

Istnieją dwa praktyczne sposoby pomiaru tego stosunku. Ponieważ jąder $^{12}C$ jest zawsze o wiele więcej niż $^{14}C$, możemy uzyskać dobre oszacowanie całkowitej obfitości $^{12}C$, wyznaczając po prostu całkowity ciężar atomów węgla w badanej próbce. Aby natomiast określić obfitość jąder $^{14}C$, wystarczy zmierzyć promieniotwórczość, to znaczy tempo emisji elektronów. Skoro wiemy, jaki ułamek jąder $^{14}C$ rozpada się w określonym

przedziale czasu, to taki pomiar da się zastosować do wyznaczenia zawartości $^{14}C$.

Bardziej nowoczesna metoda polega na umieszczeniu badanej próbki w akceleratorze, w którym możemy fizycznie rozdzielić jądra $^{14}C$ i $^{12}C$, dzięki temu, że inaczej poruszają się one w silnych polach elektrycznych i magnetycznych. Obie metody dają zgodne wyniki.

Datowanie radiowęglowe, bo tak się nazywa ta technika, wykorzystuje się powszechnie w archeologii i paleobiologii. Dzięki niemu udało się nam na przykład wyznaczyć wiek znalezisk pochodzących ze starożytnego Egiptu, między innymi mumii, a także pozostałości po neandertalczykach. Wiek niektórych przedmiotów znalezionych w Egipcie możemy też oszacować na podstawie zapisów historycznych i obie te metody dają zgodne wyniki. Neandertalczycy nie prowadzili zapisków, ale dzięki datowaniu radiowęglowemu wiemy, że ich społeczności rozwijały się prężnie w Europie przez kilkaset tysięcy lat i były obecne na Ziemi jeszcze przed 40 000 lat.

Możemy również datować kości i znaleziska związane z pierwszymi przedstawicielami człowieka rozumnego (*Homo sapiens*). Dzięki tym pozostałościom udało się stwierdzić, że nasz gatunek istnieje już od około 300 000 lat. Takich najstarszych znalezisk jest niewiele, co sugeruje, że populacja ludzi musiała być wówczas nieduża. Początkowo *Homo sapiens* nie był zbyt przebojowym gatunkiem.

Należy w tym miejscu podkreślić, że mamy wiele możliwości potwierdzenia wieku znalezisk ustalonego na podstawie datowania radiowęglowego. Możemy tworzyć drabiny czasowe, wykorzystując podejście podobne do tego jak w przypadku omawianych wcześniej drabin odległości. Prosty, klasyczny i szczególnie piękny przykład takiej metody dotyczy drzew. Każdego roku w pniu drzewa tworzy się nowy słój roczny, ponieważ komórki drewna narastające w różnych porach roku mają inny wygląd i są łatwo odróżnialne. Możemy więc sprawdzić, że datowanie radiowęglowe daje poprawne wartości względnego wieku poszczególnych słojów i że pozwala trafnie określić wiek całego drzewa.

Oprócz jąder węgla $^{14}C$ i $^{12}C$ istnieje jeszcze wiele innych par izotopów o zupełnie innym czasie połowicznego rozpadu. Wykorzystując w zasadzie tę samą technikę, możemy posłużyć się nimi do mierzenia o wiele dłuższych odcinków czasu niż w przypadku datowania radiowęglowego.

Izotopy uranu i ołowiu pozwoliły nam na przykład określić wiek próbek pewnego minerału (gnejsu) z zachodniej Grenlandii. Badacze uzyskali zgodne wartości wynoszące około 3,6 miliarda lat. Domyślamy się więc, że skały te powstały 3,6 miliarda lat temu i później nie brały już udziału w żadnych istotnych procesach chemicznych. Dzięki temu dowiedzieliśmy się, że Ziemia jest skalistą planetą od bardzo dawna i istnieje w tej postaci przez istotny ułamek – ponad jedną czwartą – czasu istnienia obserwowalnego Wszechświata.

Natomiast wiek gwiazd możemy określać dzięki wykorzystaniu astrofizycznej teorii ich ewolucji. Gwiazdy wytwarzają energię, spalając paliwo jądrowe. W miarę zużywania tego paliwa zmienia się rozmiar i kolor tych obiektów. Uczeni przewidują na przykład, że za jakieś pięć miliardów lat Słońce przekształci się w czerwonego olbrzyma. Gdy do tego dojdzie, rozszerzy się ono tak bardzo, że pochłonie Merkurego i Wenus, a warunki panujące na Ziemi będą skrajnie niesprzyjające życiu. Z teorii tej wynika również, że około miliarda lat później Słońce odrzuci swoją powiększoną atmosferę i zapadnie się do postaci gorącego białego karła wielkości Ziemi. Potem będzie się powoli ochładzało i w końcu, po upływie kilku miliardów lat, całkowicie zgaśnie.

Mamy wiele sposobów pozwalających sprawdzić poprawność teorii ewolucji gwiazd. Możemy na przykład przeprowadzić obserwacje grup gwiazd istniejących blisko siebie w gromadzie. Wydaje się, że możemy bezpiecznie założyć, iż wiele z nich powstało mniej więcej w tym samym okresie (w kosmicznej skali czasu). Jeśli tak, to wszystkie powinny być w tym samym wieku. Gdy gwiazdy się starzeją, ewoluują w przewidywalny sposób, zmieniając swój kolor i jasność. Wykorzystując teorię ewolucji gwiazd, możemy więc niezależnie wyznaczyć wiek każdej pojedynczej gwiazdy. Astronomowie ustalili, że wyliczony taką metodą wiek gwiazd tworzących gromadę jest bardzo podobny, co pozwala potwierdzić poprawność teorii i ustalić wiek całej gromady.

W ten sposób udało nam się stwierdzić, że niektóre najstarsze gwiazdy są niemal tak wiekowe jak obserwowalny Wszechświat. Mówiąc ściślej, proces tworzenia się gwiazd rozpoczął się już jeden lub dwa miliardy lat po Wielkim Wybuchu. Równocześnie astronomowie zaobserwowali też wiele dość młodych gwiazd, a nawet wykryli obszary, w których wciąż powstają nowe.

Podsumowując, możemy powiedzieć, że:

• Gwiazdy i planety zaczęły powstawać we Wszechświecie dość wcześnie, około trzynastu miliardów lat temu. Obecnie nadal rodzą się nowe gwiazdy, ale dochodzi do tego coraz rzadziej.

• Słońce i Ziemia istnieją w postaci podobnej do obecnej już od około pięciu miliardów lat.

• Ludzie pojawili się na Ziemi w postaci zbliżonej do obecnej znacznie później, mniej więcej 300 000 lat temu. Okres ten odpowiada mniej więcej 10 000 pokoleń (innymi słowy, jest to czas około 5000 razy większy od długości życia przeciętnego człowieka).

## CZAS WEWNĘTRZNY: CO WIEMY I JAK SIĘ TEGO DOWIEDZIELIŚMY

*Wewnętrzna obfitość* czasu staje się dostrzegalna, gdy porównamy czas życia przeciętnego człowieka z prędkością podstawowych procesów elektrycznych i chemicznych, dzięki którym ludzie myślą. Takie porównanie pokazuje, że w czasie naszego życia możemy doświadczyć ogromnej liczby wrażeń i mieć nieskończenie wiele myśli.

### *Prędkość myśli*

Wolfgang Amadeus Mozart zmarł w wieku trzydziestu pięciu lat; Franz Schubert – w wieku trzydziestu jeden lat; Évariste Galois, wielki matematyk, miał w chwili śmierci zaledwie dwadzieścia lat; James Clerk Maxwell, wspaniały fizyk, dożył czterdziestu ośmiu lat. Te przykłady pokazują, że w jednym, nawet krótkim życiu można zmieścić naprawdę dużo twórczych myśli. Ile?

Żadna konkretna miara prędkości nie nadaje się do mierzenia zdumiewającej różnorodności procesów zachodzących w mózgu, tak sformułowane pytanie jest więc do pewnego stopnia niejednoznaczne. Mimo to wydaje mi się, że możemy na nie odpowiedzieć w przybliżony, ale jednak sensowny sposób.

Jednym z podstawowych ograniczeń szybkości przetwarzania sygnałów w ludzkim mózgu jest długość przerwy (opóźnienie) między impulsami elektrycznego aktywowania (czyli momentami pojawienia się potencjału czynnościowego), które służą neuronom do komunikowania się między sobą. Komórka potrzebuje czasu, by osiągnąć ponownie potencjał spoczynkowy, i fakt ten nakłada ograniczenie na maksymalną liczbę impulsów nerwowych, jakie może przenosić – wartość ta wynosi od kilkudziesięciu do kilkuset impulsów na sekundę, w zależności od rodzaju neuronu. Prawdopodobnie nie jest dziełem przypadku, że prędkość odtwarzania filmu, przy której możemy zauważyć, że tak naprawdę oglądamy ciąg pojedynczych kadrów, wynosi około czterdziestu klatek na sekundę – jest to wartość odpowiadająca dość skromnej prędkości przesyłania impulsów nerwowych. Tak wyznaczona liczba klatek na sekundę jest obiektywną miarą tego, jak szybko potrafimy przekształcać sygnały wzrokowe do postaci nadającej się do dalszego przetwarzania w mózgu. Oznacza to, że w ciągu całego życia możemy przetworzyć i „zrozumieć” około stu miliardów różnych kadrów.

Liczba świadomych myśli, które możemy rozważać, jest prawdopodobnie dużo mniejsza, ale i tak wciąż imponująco duża. Średnia prędkość mowy wynosi na przykład około dwóch słów na sekundę. Jeśli przyjmiemy, że pięć słów może stanowić już jakąś sensowną myśl, to dojdziemy do wniosku, że w czasie życia przeciętnego człowieka mieści się około miliarda myśli.

Z tego oszacowania wynika, że mamy ponad miliard okazji, by doświadczyć świata. W tym istotnym sensie możemy więc powiedzieć, że mamy do dyspozycji mnóstwo czasu wewnętrznego. Niewykluczone, że jest to zbyt ostrożne oszacowanie, ponieważ ludzki mózg potrafi przetwarzać informacje równolegle, a zatem w jednej chwili może w nim krążyć kilka różnych myśli – najczęściej w podświadomości.

W *Pieśni miłosnej J. Alfreda Prufrocka* T.S. Eliot dochodzi do takiego samego wniosku, choć w nieco bardziej ironiczny sposób: „W minucie znajdzie się czas, / By postanowić i sprostować / To, co minuta odmieni”[14].

Korzystając z dokonań przodków i pomocy nowoczesnych maszyn, możemy znacznie powiększyć nasze możliwości umysłowe. Nie musimy odkrywać od podstaw, co należy zrobić, by zaspokoić swoje podstawowe potrzeby, takie jak utrzymanie odpowiedniej temperatury lub zdobycie

pożywienia. Wchodząc na nieco wyższy poziom, zauważmy, że nie trzeba odkrywać na nowo rachunku różniczkowego i całkowego ani podstaw współczesnej nauki i techniki. A dzięki nowoczesnym komputerom i Internetowi nie musimy nawet marnować cennych cykli myślowych na wykonywanie żmudnych obliczeń czy zapamiętywanie mnóstwa informacji. Korzystając z takich udogodnień, możemy zlecać maszynom i innym ludziom wiele zadań wymagających myślenia. Uwalniamy w ten sposób zasoby wewnętrznego czasu, które warto poświęcić na coś innego.

Natura nie jest ograniczona prędkością ludzkiej myśli. Zdarzenia mogą zachodzić dużo szybciej niż prędkość czterdziestu klatek na sekundę, z jaką możemy je przetwarzać, dlatego ludzki wzrok nie jest w stanie ich dostrzec. Zauważmy, że „prędkość zegara" nowoczesnych procesorów, takich, jakie montuje się na przykład w najnowszych laptopach, sięga dziesięciu gigaherców, co odpowiada szybkości dziesięciu miliardów operacji na sekundę. Komputery mogą działać szybciej niż ludzki mózg, ponieważ w tranzystorach wykorzystuje się napędzany elektrycznie ruch elektronów, a nie dużo wolniejsze procesy dyfuzji i zmian chemicznych, które leżą u podstaw działania neuronów. Przyjmując taką naturalną miarę, możemy zauważyć, że graniczna prędkość w przypadku sztucznej inteligencji jest około miliarda razy większa od prędkości myśli inteligencji naturalnej.

## MIERZENIE CZASU

Historia zegarów i technik pomiaru czasu ma bardzo bliski związek z historią fizyki. Jednymi z pierwszych zegarów były przyrządy mierzące położenie Słońca na niebie (zegary słoneczne), klepsydry wykorzystujące przesypywanie się piasku i podobne urządzenia bazujące na przepływie wody, spalaniu się świec i innych zbliżonych procesach. Wybitni naukowcy, tacy jak Galileusz i Christian Huygens, budowali mechaniczne zegary z wahadłem, których konstrukcję udoskonalano przez wiele dziesięcioleci, tak że pozostawały wzorcem dokładności aż do XX stulecia.

W wieku XX pojawiły się bardziej niezawodne zegary, oparte na zupełnie innych procesach fizycznych. W nowoczesnych zakładach produkujących zegary wahadła i sprężyny zostały wyparte najpierw przez drgające

kryształy, a potem przez drgające atomy. Takie małe oscylatory są mniej podatne na zakłócenia ze świata zewnętrznego, a tarcie nie stanowi w nich większego problemu. Dzięki temu najlepsze współczesne zegary atomowe są zaskakująco dokładne – potrafią mierzyć czas z dokładnością do jednej dziesięciobiliardowej ($10^{-16}$) procent. To oznacza, że wskazania dwóch takich zegarów działających od początku istnienia Wszechświata zgadzałyby się ze sobą z dokładnością do około jednej sekundy. Obecnie wytwarza się względnie tanie, małe (wielkości układu scalonego) zegary atomowe, które odmierzają czas z dokładnością do jednej stumiliardowej ($10^{-11}$) procent. Po upływie miliona lat takie zegary mogą się spóźniać lub spieszyć najwyżej o kilka sekund.

Tak duża dokładność może się wydawać ekstrawagancją, ale okazuje się, że takie przyrządy są niezwykle przydatne. W urządzeniach systemu GPS ich dokładność przekłada się na możliwość dokonywania dokładnych pomiarów odległości. (Dzięki takim pomiarom możemy na przykład ustawiać precyzyjnie wielkie maszyny). Zauważmy, że po pomnożeniu przez prędkość światła nawet niewielkie błędy w pomiarze czasu przekładają się na zauważalne błędy w wyznaczaniu odległości.

Projektowanie coraz precyzyjniejszych i dokładniejszych zegarów stanowi duże wyzwanie i dzięki tym potrzebom powstała już cudownie twórcza gałąź współczesnej fizyki. Szczególnie bliski mojemu sercu jest jeden z najnowszych pomysłów z tej dziedziny. Otóż okazuje się, że być może uda się wykorzystać do mierzenia czasu dużą liczbę odpowiednio przygotowanych atomów, współpracujących ze sobą w ramach nowego stanu materii, którego istnienie kiedyś przewidziałem, zanim rzeczywiście został zaobserwowany – chodzi o strukturę znaną jako „kryształ czasowy”. Taka struktura mogłaby się przydać do poprawienia dokładności zegarów atomowych bazujących na pomiarach drgań pojedynczego atomu.

### *Problem krótkich odcinków czasu*

Podobnie jak w odniesieniu do pomiaru odległości, również w przypadku czasu mierzenie niezwykle krótkich odcinków wymaga stosowania innych, mniej bezpośrednich metod. Omawiając pomiary przestrzenne, powiedzieliśmy, że dzięki wykorzystaniu dyfrakcji promieni rentgenowskich i rozpraszania takiego jak w doświadczeniu Geigera

i Marsdena jesteśmy w stanie uzyskać informację, którą można przekształcić do postaci map (czyli obrazów) świata atomowego i subatomowego. Te techniki polegają na obserwowaniu, w jaki sposób nasz cel – czyli obiekt, który chcemy zobaczyć – zmienia ruch padających nań promieni rentgenowskich lub cząstek.

Aby zobaczyć strukturę szybko zachodzących wydarzeń, stosuje się podobne metody, ale bazujące na obserwacji zmian energii, a nie kierunku ruchu. Świat wartko następujących po sobie zdarzeń jest pełen cudów i niespodzianek. Omówmy więc kilka najciekawszych przypadków – oczywiście krótko, jak przystało na tę dziedzinę wiedzy.

Dzięki laserom o dużej mocy możemy zarejestrować ciąg zdarzeń zachodzących w wielu procesach chemicznych i biochemicznych. *Femtochemia* jest działem chemii zajmującym się badaniem przebiegów czasowych, w których poszczególne zdarzenia mogą zachodzić w odstępach tak krótkich, jak $10^{-15}$ sekundy (czyli jedna femtosekunda). Dzięki lepszemu zrozumieniu takich procesów pojawiają się nowe możliwości. Podczas operacji oczu metodą LASIK wykorzystuje się właśnie lasery femtosekundowe do odpowiedniego ukształtowania rogówki pacjenta.

Potężne akceleratory pozwalają nam mierzyć nawet jeszcze krótsze odcinki czasu. W dalszej części książki przedstawimy kilka przykładów tego typu badań. Teraz zauważmy jedynie, że cząstka Higgsa, której odkrycie było ogromnym sukcesem fizyki XXI wieku, jest bardzo nietrwała. Istnieje zaledwie przez około $10^{-22}$ sekundy. Aby więc zebrać dowody potwierdzające jej pojawienie się, fizycy musieli odtworzyć przebieg zdarzeń zachodzących w tak krótkiej skali czasowej.

## PRZYSZŁOŚĆ CZASU

### *Inżynieria czasu fizycznego*

Ogólna teoria względności Einsteina odnosi sukces za sukcesem jako nasza teoria grawitacji. Jednoznacznie dowodzi, że czasoprzestrzeń może się zakrzywiać i odkształcać. Ten fakt jest pożywką dla marzeń o podróżach

w czasie, portalach, tunelach czasoprzestrzennych i silnikach warp. Czy któregoś dnia te fantazje i pragnienia mogą się znaleźć w zasięgu naszych możliwości technicznych i inżynieryjnych?

Nie mam zbyt wielkiej nadziei na to, że w dającej się przewidzieć przyszłości nauczymy się wpływać na czas fizyczny. Na ironię zakrawa fakt, że obserwatorium fal grawitacyjnych LIGO (od ang. *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* – obserwatorium fal grawitacyjnych wykorzystujące interferometrię laserową), dzięki któremu uzyskaliśmy najnowsze i być może najbardziej jednoznaczne potwierdzenie poprawności ogólnej teorii względności, bardzo wyraźnie pokazuje, na czym polega problem z takimi marzeniami.

W obserwatorium LIGO działa niezwykły przyrząd zaprojektowany w taki sposób, że pozwala wykryć nawet znikomo małe zakrzywienia czasoprzestrzeni. Urządzenie to mierzy zmiany względnego położenia luster oddalonych od siebie na odległość czterech kilometrów. Potrafi zarejestrować przesunięcia, które są tysiąc razy mniejsze od rozmiaru jądra atomowego. Dopiero tak duża czułość detektorów umożliwiła wykrycie zniekształcenia powstałego w wyniku gwałtownego połączenia się dwóch czarnych dziur, z których każda miała masę kilkadziesiąt razy większą od masy Słońca. Płynie z tego prosty wniosek: czasoprzestrzeń *można* odkształcić, *ale* to jest bardzo ciężka praca.

### *Inżynieria czasu psychologicznego: przeskoki i cykle*

Czas fizyczny jest bardzo sztywny. Z praktycznego punktu widzenia możemy powiedzieć, że płynie równomiernie w jednym kierunku, tak samo dla każdego obiektu istniejącego w fizycznym Wszechświecie. Czas psychologiczny jest jednak zupełnie inny. Może tworzyć meandry, rozgałęzienia i zwinnie przeskakiwać w różne miejsca. Mamy zdolność powracania myślami do przeszłości i przywoływania wspomnień. Gdy to robimy, możemy przebiec przez nie szybko, przeżywać je powoli lub przeskakiwać z chwili do chwili. Możemy nawet je zmieniać, wyobrażając sobie, jak inaczej mogłyby się potoczyć nasze losy. Na co dzień wyobrażamy sobie różne możliwe wersje przyszłości i plany działania, by znaleźć najlepsze wyjście z danej sytuacji. Być może na tym właśnie polega

najważniejsza funkcja płatów czołowych – masywnych, poskręcanych części mózgu, które występują tylko u ludzi i odróżniają nas od zwierząt.

Komputery są w zasadzie nieczułe na upływ czasu i mogą powracać dokładnie do dawnego stanu, a nawet wykonywać kilka programów równolegle. Sztuczna inteligencja bazująca na takiej technice będzie mogła kształtować swój czas psychologiczny z dużą precyzją i elastycznością. Zauważmy, że mogłaby wyodrębnić stany, które sprawiają jej przyjemność, a potem przeżywać je wielokrotnie, doświadczając ich tak samo jak za pierwszym razem.

*Inżynieria czasu psychologicznego: szybkość*

Istnieje ogromny rozziew między szybkością ludzkiej myśli – która wynosi kilkadziesiąt impulsów na sekundę – a obecną szybkością myśli napędzanych ruchem elektronów, których prędkość wynika z tempa działania komputerowych zegarów. Jak już zauważyliśmy, wartości te różnią się o czynnik rzędu miliarda. Podstawowe femtosekundowe procesy atomowe zachodzą jeszcze szybciej – w ich przypadku mówimy o dodatkowym czynniku wynoszącym wiele tysięcy. Zatem wciąż jest miejsce na to, by upakować w każdej chwili dużo więcej wrażeń.

Ludzie ukształtowani na drodze odpowiednio zaprogramowanej ewolucji, cyborgi lub całkowicie sztuczna inteligencja mają duże szanse na to, by pokonać obowiązujący (obecnie) standard szybkości myśli. Jeśli nie dojdzie do katastrofalnej wojny jądrowej lub zmian klimatu, może to nastąpić już wkrótce – sądzę, że w ciągu najbliższych dziesięcioleci.

Idąc dalej, możemy sobie wyobrazić jakieś formy inteligencji bazującej na procesach subatomowych, które byłyby jeszcze szybsze. W pasjonującej książce fantastycznonaukowej *Dragon's Egg* (Jajo smoka) Robert Forward wykorzystuje właśnie tę możliwość. Opisuje inteligentne istoty żywe noszące nazwę cheela, które rozwijają się na powierzchni gwiazdy neutronowej. W takim środowisku największe znaczenie musi mieć chemia jądrowa, a nie atomowa. W reakcjach związanych z chemią jądrową następuje wymiana dużo większej energii niż w przypadku chemii tradycyjnej i w związku z tym procesy te zachodzą o wiele szybciej. W czasie, który człowiekowi wydaje się mgnieniem oka, w społeczeństwie tych istot mijają całe epoki historyczne. Forward opisuje astronautów,

którzy odkrywają na jednej z gwiazd neutronowych dziką, zacofaną formę życia, ale po upływie pół godziny okazuje się, że społeczność cheela, po uzyskaniu dostępu do zasobów bibliotecznych na statku, całkowicie prześcignęła ich w rozwoju.

*Inżynieria czasu psychologicznego: trwałość*

W *Podróżach Guliwera* Jonathana Swifta występuje rasa nieśmiertelnych istot zwanych Struldbruggami. Choć są nieśmiertelni, Struldbruggowie się starzeją. Stają się słabowitymi, żałosnymi stworzeniami, które są ciężarem dla społeczeństwa. Nieszczęście, a może raczej zło nieśmiertelności jest często przewijającym się tematem w mitach i literaturze. Z tych opowieści płynie jeden morał: jeśli chodzi o długowieczność, uważaj, czego sobie życzysz.

Szczerze mówiąc, moim zdaniem autorzy takich opowieści malują pesymistyczny obraz głównie po to, by nie odczuwać żalu. Utrata wspomnień i zdobytej wiedzy na skutek śmierci jest czymś okropnym i stanowi dużą stratę. Wydłużenie czasu zdrowego ludzkiego życia powinno być jednym z głównych celów nauki.

11 Lucjusz Anneusz Seneka, *O krótkości życia*, przeł. Leon Joachimowicz [w:] Lucjusz Anneusz Seneka, *Dialogi*, Instytut Wydawniczy PAX, Warszawa 1998, s. 120 (przyp. tłum.).

12 Św. Augustyn, *Wyznania*, przeł. Zygmunt Kubiak, Wydawnictwo Znak, Kraków 1994, s. 266 (przyp. tłum.).

13 Oczywiście trzeba byłoby się wykazać nie lada cierpliwością, by mierzyć dni liczbą uderzeń serca. Możemy jednak na przykład wykorzystać zmianę długości cienia do podzielenia dnia na krótsze odcinki.

14 T.S. Eliot, *Pieśń miłosna J. Alfreda Prufrocka*, przeł. Władysław Dulęba [w:] T.S. Eliot, *Wybór poezji*, Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław 1990, s. 11 (przyp. tłum.).

# 3

# Istnieje tylko kilka składników

W dzieciństwie uczymy się, jaką rolę w naszym życiu odgrywają inni ludzie, zwierzęta, rośliny, woda, gleba, kamienie, wiatr, Słońce i Księżyc, gwiazdy, obłoki, książki czy smartfony. Budujemy różne modele pozwalające nam rozpoznawać każdy z tych obiektów i przewidywać, jak mogą one na nas oddziaływać i jak my możemy wpływać na nie. Idea, że wszystkie są zbudowane z garstki podstawowych składników występujących w ogromnych ilościach, nie stanowi ważnego elementu tych modeli. A jednak tak właśnie brzmi najistotniejszy wniosek płynący z rozwoju nauki.

## ATOMY I NIE TYLKO

> Gdyby cała nauka miała ulec zniszczeniu w jakimś kataklizmie i tylko jedno zdanie można by uratować od zagłady i przekazać następnym pokoleniom, jakie zdanie zawierałoby największą ilość informacji w możliwie najmniejszej liczbie słów? W moim przekonaniu byłoby to zdanie formułujące *hipotezę* (lub *rzeczywistość*, jeśli wolicie tak to nazwać) *atomistyczną*, że *wszystko składa się z atomów* […][15]
>
> Richard Feynman

Słowo „atom” pochodzi od greckiego określenia oznaczającego „bez części”. Bardzo długo sądzono, że te najmniejsze obiekty, które ulegają wymianie w reakcjach chemicznych, są ostatecznymi, niepodzielnymi

jednostkami materii. Ponieważ stanowią podstawowe składniki związków chemicznych, nazwano je „atomami” i taka nazwa już do nich przylgnęła.

Gdy jednak uczeni zaczęli badać materię w bardziej ekstremalnych warunkach niż te, które najczęściej towarzyszą reakcjom chemicznym, odkryli, że chemiczne „atomy” można w istocie rozbić na jeszcze mniejsze kawałki. Zatem „atomy”, które pod taką właśnie nazwą występują w najczęściej w literaturze naukowej, nie są „atomami” w tym sensie, że nie stanowią najbardziej podstawowych składników materii.

Tradycyjne atomy chemii składają się z jądra atomowego i krążących wokół niego elektronów. Jądro można dalej podzielić na protony i neutrony. Ale to jeszcze nie koniec. Według najlepszego współczesnego modelu świata atomy składają się z elektronów, fotonów, kwarków i gluonów. Jak się wkrótce przekonamy, mamy dobre podstawy, by sądzić, że to już jest *naprawdę* ostatnie słowo.

Te odkrycia, które stanowią obecnie podstawę naszej wiedzy, są rozwinięciem idei hipotezy atomistycznej. Wynika z nich jednak wniosek, że powinniśmy tę hipotezę sformułować na nowo (a może także zmienić jej nazwę). Zamiast mówić, że „wszystko składa się z atomów”, powinniśmy powiedzieć „wszystko składa się z cząstek elementarnych”. Jednak bez względu na to, jak ją sformułujemy, jej przesłanie jest jasne: warto badać materię, by stwierdzić, jakie są jej najmniejsze składniki podstawowe. Jeśli zrobimy to poprawnie, możemy odwrócić cały proces i skonstruować pojęciowo nasz fizyczny świat.

Współczesna nauka konstruuje fizyczną rzeczywistość z kilku podstawowych składników, ale jednocześnie wymaga od nas wyobrażenia sobie na nowo, czym owe „podstawowe składniki” są i jak wygląda proces tworzenia takiej „konstrukcji”. Nic z tego, czego doświadczamy na co dzień, nie przygotowuje nas do zrozumienia nowych wersji tych zwyczajnych, zdawałoby się, pojęć.

## ZASADY: RZECZYWISTOŚĆ I JEJ RYWALE

Najbardziej podstawowymi składnikami fizycznej rzeczywistości są elementy niewielkiego zbioru zasad i własności. Owe zasady i własności

*wyraża się* za pomocą obiektów, które nazywamy cząstkami elementarnymi. Jednak „cząstki elementarne” różnią się w istotny sposób od wszystkiego, co znamy z doświadczenia, i jeśli chcemy je poprawnie zrozumieć, musimy wyjść od wspomnianych zasad i własności.

*Cztery (pozornie) proste zasady*

Cztery proste, ale jednocześnie głębokie ogólne zasady decydują o tym, jak działa świat. Najpierw przedstawimy je wszystkie po kolei w telegraficznym skrócie, a potem wyjaśnimy nieco dokładniej.

1. *Podstawowe prawa opisują zmianę*. Warto podzielić opis świata na dwie części: stany i prawa. Stany określają, „co istnieje”, prawa natomiast stwierdzają, „jak rzeczy się zmieniają”.
2. *Podstawowe prawa są powszechne*. Innymi słowy, podstawowe prawa obowiązują wszędzie i w każdym czasie.
3. *Podstawowe prawa są lokalne*. To znaczy, że zachowanie jakiegoś ciała w najbliższej przyszłości zależy wyłącznie od bieżących warunków i jego najbliższego otoczenia. W standardowej nomenklaturze naukowej jest to tak zwana zasada *lokalności*.
4. *Podstawowe prawa są dokładne*. Prawa te są sformułowane precyzyjnie i nie dopuszczają żadnych wyjątków. Można je zapisać w postaci równań matematycznych.

Prostota tych ogólnych zasad jest zwodnicza. W żadnym razie nie są to rzeczy oczywiste. Stwierdzenia te być może nawet nie do końca są prawdziwe. Ich siła wynika nie z logicznej konieczności, ale z faktu, że okazały się pomocne. Pozwoliły nam uzyskać zdumiewająco poprawny opis działania świata fizycznego, czego świadectwem może być ta książka.

Na przestrzeni długich dziejów ludzkości pojawiło się mnóstwo różnych poglądów na temat tego, jak działa fizyczny świat. W historii i tradycji ludowej możemy znaleźć wiele idei stojących w sprzeczności z którąś z powyższych zasad, ba, do niedawna tego typu koncepcje pojawiały się również w dziełach uznanych naukowców, filozofów i teologów. Czasami, jak w przypadku astrologii, telepatii, jasnowidzenia i czarów, mowa jest o potężnych siłach działających na obiekty oddalone znacznie od siebie w przestrzeni i czasie. W innych przypadkach, takich jak postrzeganie

pozazmysłowe, telekineza, wymodlone cuda i magiczne myślenie, ludzkiemu umysłowi i sile woli przypisuje się zdolność kształtowania przebiegu fizycznych zdarzeń. Większość takich idei stanowi „sensowne" rozszerzenie modeli świata, które tworzymy w dzieciństwie, ponieważ w tych modelach nasz umysł jest wolny od cielesności, a wola sprawuje całkowitą kontrolę nad ciałem. Na przestrzeni dziejów wiele narodów akceptowało niektóre modele świata należące do tej grupy (a czasami nawet wszystkie).

Patrząc na bieg historii ludzkości, możemy stwierdzić, że tylko nieliczne osoby próbowały wysuwać dokładne przewidywania odnośnie do tego, co dzieje się w ściśle kontrolowanych warunkach. Mało kto dopuszczał nawet do siebie myśl, że coś takiego jest możliwe. Jednak właśnie ta możliwość jest najważniejszym wnioskiem płynącym z naszych zasad. Przedstawione przed chwilą ogólne reguły zostały jasno sformułowane po raz pierwszy dopiero w XVII stuleciu. Są jednym z najważniejszych osiągnięć rewolucji naukowej.

Z pierwszej zasady płynie proste przesłanie, że możemy się jednak zmierzyć z pytaniem „Co wydarzy się dalej?", a uzyskane odpowiedzi dadzą nam więcej niż próby poradzenia sobie z pytaniem „Dlaczego rzeczy są takie, jakie są?". Zagadka „Co wydarzy się dalej?" jest możliwa do rozwiązania, ponieważ dzięki drugiej i trzeciej zasadzie da się przeprowadzić doświadczenia, by to wyjaśnić. To znaczy możemy przygotować dokładną kopię interesującej nas sytuacji – skonstruować taki sam stan – i obserwować, co się będzie działo.

Kluczowe znaczenie ma druga zasada, która pozwala nam realizować takie „oczywiste" rozwiązanie – przeprowadzać doświadczenia – w praktyce, ponieważ wynika z niej, że możemy wykonywać eksperymenty wszędzie i w dowolnym czasie. Zasada powszechności głosi, że zawsze zaobserwujemy działanie tych samych praw podstawowych.

Trzecia zasada, która dotyczy lokalności, pozwala nam wprowadzić kolejne ważne uproszczenie. Wynika z niej, że formułując prawa, nie musimy brać pod uwagę całego Wszechświata ani całej historii. Mówiąc dokładniej, zasada ta oznacza, że możemy być spokojni o to, iż uwzględniliśmy wszystkie istotne czynniki, jeśli tylko weźmiemy pod uwagę wszystko to, co dzieje się tu i teraz.

I wreszcie czwarta zasada, mówiąca o dokładności, jest zachętą do tego, by stawiać sobie ambitne cele. Wynika z niej, że jeśli opiszemy prawa za pomocą właściwych pojęć, to uzyskany opis będzie zwięzły, a ponadto pełny i całkowicie dokładny. Na tym polega wyzwanie – nic innego nie powinno nas zadowolić.

Mówiąc krótko, zasady te zapewniają nas, że wykonując doświadczenia, możemy odkryć dokładne, powszechne prawa opisujące, jak wszystko się zmienia. Nauka systematycznie i bez wytchnienia dąży do takiego właśnie celu.

Nasze cztery zasady, rozumiane jako całość, stanowią doskonałą strategię dokonywania odkryć. Musimy zacząć od zbadania, co dzieje się w ściśle określonych, prostych warunkach, które potrafimy wielokrotnie odtworzyć. Gdy już to ustalimy, możemy podjąć próbę odgadnięcia, co zdarzy się w bardziej skomplikowanych sytuacjach.

Dzieci – a nawet młode zwierzęta – wykorzystują taką samą strategię eksperymentalną w celu przystosowania się do fizycznej rzeczywistości. Wyciągając wnioski z wielu doświadczeń przeprowadzanych w różnych miejscach, różnym czasie i w różnych warunkach, małe dzieci uczą się na przykład tego, jak rzuca się piłką, jak należy wkładać pożywienie do ust i setek innych praktycznych umiejętności, które wprowadzają zmiany w fizycznym świecie. Uczeni i ludzie otwarci na naukę są urodzonymi na nowo odkrywcami. W odróżnieniu jednak od małych dzieci mamy w ręku ważny atut – możemy wykorzystywać w swoich badaniach logiczny umysł, przyrządy poszerzające możliwości naszych zmysłów i dokonania odkrywców, którzy działali przed nami.

### *Newton i lokalność*

Newton był bardzo niezadowolony z jednego ze swoich najsłynniejszych odkryć. Nie podobało mu się, że z prawa powszechnego ciążenia wynika, iż siła grawitacyjna, z jaką jedno ciało (nazwijmy je B) działa na drugie (niech się nazywa A), przenosi się w sposób natychmiastowy, bez żadnego opóźnienia, bez względu na to, jak daleko są od siebie oba te ciała. To oznacza, że nie możemy przewidzieć ruchu ciała A wyłącznie na podstawie warunków panujących w jego najbliższym otoczeniu – musimy na przykład wiedzieć, gdzie znajduje się ciało B. Newton był bardzo rozczarowany tą

cechą odkrytego przez siebie prawa i dał wyraz swojemu niezadowoleniu w liście do przyjaciela, Richarda Bentleya:

> To, że jedno ciało może działać przez próżnię na drugie, odległe ciało, bez współudziału czegokolwiek, co mogłoby przenosić ich działania i siłę, wydaje mi się tak wielkim absurdem, że uważam, iż nikt, kto ma przyzwoite obeznanie w sprawach filozoficznych, nie powinien na to przystać.

Newton zdawał sobie sprawę, że jego prawo powszechnego ciążenia nie jest lokalne – innymi słowy, że nie spełnia trzeciej z naszych zasad – i wcale mu się to nie podobało.

Jednak zarówno on sam, jak i uczeni na przestrzeni kilku następnych pokoleń uznali, że jest to czysto teoretyczna wada. Prawo powszechnego ciążenia spisywało się doskonale w praktycznych zastosowaniach. Można było powiedzieć, że jego niedociągnięcia są natury estetycznej czy nawet – jak uważał sam Newton – teologicznej. Wydawało się, że są niewielką usterką w nienagannym pod każdym innym względem dziele Boga.

Przekonanie Newtona o poprawności naszej trzeciej zasady – zasady lokalności działań – okazało się zdumiewająco prorocze. Wiele lat po jego śmierci, mniej więcej od połowy XIX stulecia, fizycy zaczęli zapełniać pasywną „próżnię” – ową nicość, pustkę, która tak niepokoiła Newtona – materiałami przenoszącymi oddziaływania, które nazwali polami. We współczesnej fizyce to właśnie pola, a nie cząstki, są podstawowymi składnikami materii[16].

*Studium przypadku: zegary atomowe*

Zegary atomowe stanowią doskonały przykład działania naszych podstawowych zasad.

Bijącym sercem takich zegarów są drgające atomy. Ich stan fizyczny wpływa na to, jak się zmieniają – w tym przypadku określa, jak szybko drgają (zgodnie z pierwszą zasadą). Co ważne, badacze zmierzyli szybkość drgań atomów w różnych miejscach i w różnym czasie i zawsze uzyskiwali spójne wyniki (zgodnie z drugą zasadą), jeśli tylko pamiętali o tym, że

należy zapewnić właściwe warunki laboratoryjne (wykorzystując i spełniając trzecią zasadę). Ponadto, jak już wcześniej wspomnieliśmy, szybkość drgań atomów udało się zmierzyć z niezwykłą dokładnością i uzyskać pasujące do siebie wyniki (zgodnie z zasadą czwartą).

Zarówno w tym przypadku, jak i podczas wykonywania większości doświadczeń najtrudniejszą kwestią jest „zapewnienie właściwych warunków". Aby uzyskać zgodne wyniki, fizycy doświadczalni muszą mieć pewność, że skomplikowane, precyzyjnie dostrojone przyrządy, za pomocą których łapią atomy i obserwują ich zachowanie – takie jak lasery, nowoczesne urządzenia chłodzące, komory próżniowe i wiele skomplikowanych układów elektronicznych – są stabilne. Należy je osłonić przed wpływem drgań gruntu powodowanych przez przejeżdżające ciężarówki i ruchy sejsmiczne samej Ziemi. Nie można pozwolić na to, by rozbawione dzieci lub nieuważni studenci wałęsali się po laboratorium i dotykali różnych przyrządów. Kluczową kwestią trzeciej zasady – zasady lokalności – jest to, że wszystkie te czynniki, po uwzględnieniu żmudnych poprawek na temperaturę, wilgotność i tak dalej, wpływają na lokalne warunki. (Ciężarówka może przejeżdżać dość daleko, ale znaczenie mają drgania samego laboratorium). Na szczęście nie musimy się przejmować odległym Wszechświatem, tym, co wydarzyło się w przeszłości, ani tym, co zdarzy się kiedyś.

W naszym przypadku najważniejsze są atomy. Jakie czynniki musimy mieć pod kontrolą, by móc uzyskiwać powtarzalne, niezwykle dokładne wyniki, z których słyną zegary atomowe? Zasadniczo są to tylko cztery rzeczy. Musimy trzymać interesujące nas atomy z dala od innych atomów. Właśnie do tego służą urządzenia chłodzące i komory próżniowe. Należy też śledzić warunki elektryczne, magnetyczne i grawitacyjne w miejscu, w którym znajduje się atom – czyli, mówiąc językiem fizyków, musimy rejestrować wartości pól elektrycznych, magnetycznych i grawitacyjnych. Pola te da się mierzyć lokalnie, śledząc, jak poruszają się naładowane cząstki i jak szybko spadają ciała. Po wyznaczeniu odpowiednich poprawek, uwzględniających tę krótką listę czynników, możemy uważać sprawę za załatwioną. Od tej chwili każdy pomiar szybkości drgań atomu da zgodny wynik i będziemy mogli go wyznaczyć z dużą dokładnością – bo w przeciwnym razie oznaczałoby to, że odkryliśmy coś ważnego, co

umknęło uwadze wszystkich badaczy, którzy wykonywali takie doświadczenia przed nami!

Z filozoficznego punktu widzenia należy w tym miejscu zauważyć, że nie musimy brać pod uwagę tego, co myślą inni ludzie czy jakieś hipotetyczne istoty nadludzkie. Z doświadczeń wykonywanych z użyciem niezwykle czułych i dokładnych urządzeń wynikają surowe ograniczenia idei, że umysł może bezpośrednio wpływać na materię za pośrednictwem woli. Takie eksperymenty stanowią doskonałą okazję dla magików do rzucenia czarów, osoby obdarzone ponadludzkimi mocami mogą pokazać, na co je stać, a ambitny badacz może zyskać wieczną chwałę, prezentując siłę modlitwy lub pobożnych życzeń. Przecież potrafimy wykryć nawet znikomo małe efekty. Jednak nikomu jeszcze nie udało się tego dokonać.

## CO MOGŁO SIĘ NIE UDAĆ, ALE SIĘ UDAŁO

Zanim zakończymy nasze rozważania o zasadach budowania obrazu świata, wyjaśnię, posługując się prostym eksperymentem myślowym, w jaki sposób nasze zasady mogłyby okazać się błędne. Prawdę mówiąc, opiszemy tu możliwe przyszłe wszechświaty, w których nasze zasady *nie będą* obowiązywać.

Jeden z moich ulubionych eksperymentów myślowych, wykorzystany w różnych wersjach w wielu opowieściach fantastycznonaukowych i filmach z serii *Matrix*, polega na wyobrażeniu sobie inteligentnych, samoświadomych istot, które nie mają pojęcia o istnieniu otaczającego je świata fizycznego. Na potrzeby tych rozważań załóżmy, że zwolennicy koncepcji silnej sztucznej inteligencji mają rację i takie istoty mogłyby rzeczywiście istnieć. (Z uwagi na szybki rozwój sztucznej inteligencji i rzeczywistości wirtualnej wcale nie wydaje się to niemożliwe).

„Narządy zmysłów” takich hipotetycznych istot nie byłyby oknami na świat fizyczny. Odbierana przez nie informacja miałaby postać sygnałów elektrycznych wytwarzanych przez komputery. To oznacza, że „świat zewnętrzny” postrzegany przez te istoty – czyli docierające do nich dane, które interpretują jako bodźce zewnętrzne – jest tak naprawdę w naszym eksperymencie myślowym długim ciągiem sygnałów generowanych przez

program komputerowy. Ponieważ taki „świat zewnętrzny” zachowuje się zgodnie z instrukcjami przygotowanymi przez programistę, mogą w nim obowiązywać dowolne reguły, jakie wymyśli sobie autor programu.

W świecie tego rodzaju żadna z naszych zasad nie musi być spełniona.

Możemy na przykład wyobrazić sobie inteligentną, samoświadomą wersję bohatera gry Super Mario, której wszechświat zmysłowy jest całkowicie zanurzony w świecie gry. Nasz samoświadomy Super Mario żyje we wszechświecie, w którym obowiązujące prawa zależą od tego, gdzie się akurat znajduje – mówiąc ściśle, zależą od tego, na którym jest poziomie. Ogólnie rzecz biorąc, w tego rodzaju wszechświecie obowiązujące zasady mogą zostać całkowicie obalone przez nieprzewidywalne, ukryte niespodzianki wymyślone przez programistów – nie chodzi tu tylko o wymyślne reguły, ale także o tak zwane *Easter eggs*, czyli ukryte treści, które celowo łamią obowiązujące zasady.

Moglibyśmy skonstruować świat, w którym obowiązuje astrologia i w związku z tym osobowość i los człowieka naprawdę zależy od położenia gwiazd i planet w chwili jego narodzin. Moglibyśmy napisać taki program. Nic nie stoi też na przeszkodzie, by podczas zaćmienia Słońca lub Księżyca w takim świecie pojawiały się nagle różnej maści potwory. Moglibyśmy pozwolić, by nasi bohaterowie rzucali zaklęcia magiczne, które natychmiast zabijają odległych wrogów – na pohybel zasadzie lokalności! Wykorzystując liczby losowe, moglibyśmy wprowadzić dodatkowy szum, by reguły były nieprzewidywalne i nieprecyzyjne. Projektanci gier komputerowych chętnie korzystają z wszystkich tych sztuczek.

Możemy sobie wyobrazić światy, w których cuda są możliwe i faktycznie się zdarzają. Światy, których historia rozpoczyna się od ustalonego stanu przygotowanego zgodnie z zaplanowanym wcześniej scenariuszem. Tego rodzaju wymyślone światy są ucieleśnieniem głównych idei teorii inteligentnego projektu.

W ten sposób wyobraziliśmy sobie teoretyczne światy, w których nasza pierwsza zasada jest myląca, a pozostałe są zwyczajnie błędne. Takie eksperymenty myślowe pokazują, że zasady te wcale nie muszą być spełnione, a już na pewno nie są oczywiste. Fakt, że wydaje się, iż świat fizyczny, który obecnie zamieszkujemy, ich przestrzega, jest

zdumiewającym odkryciem. Niełatwo było go dokonać – i wcale nie jest łatwo się z nim pogodzić.

Za każdym razem gdy zamierzam podnieść rękę, dzieje się coś, co na pozór przeczy tym zasadom. Tak naprawdę już sama struktura gramatyczna zdania „zamierzam podnieść rękę” wiele mówi. Istnieje coś, co nazywamy „ja” – duch lub wola – co decyduje o tym, jak zachowuje się fragment świata fizycznego. Takiemu złudzeniu, a przynajmniej spojrzeniu na świat trudno się oprzeć. Jednak nasze zasady każą nam myśleć inaczej.

## WŁASNOŚCI: CZYM JEST MATERIA?

> Dzięki konwencji słodkie jest słodkie, gorzkie gorzkie, dzięki konwencji gorące jest gorące, a zimne zimne, kolor jest kolorem. Ale w rzeczywistości istnieją tylko atomy i próżnia.
>
> Demokryt (ok. 400 r. p.n.e.)

Ten fragment pochodzący z dzieł Demokryta można uznać za manifest założycielski atomizmu. Drugie zdanie – „ale w rzeczywistości istnieją tylko atomy i próżnia” – jest w gruncie rzeczy tym samym co stwierdzenie Feynmana: „wszystko składa się z atomów”.

Deklaracja Demokryta stanowi ogromne wyzwanie. Odrzuca obiektywną rzeczywistość odczuwanych wrażeń – smak, ciepło, kolor – dzięki którym możemy w sposób najbardziej bezpośredni wejść w kontakt ze światem fizycznym. Nie ulega wątpliwości, że Demokryt chciał przez to powiedzieć, iż możemy zrozumieć fizyczną rzeczywistość za pomocą podstawowych elementów – dla niego były to atomy, a dla nas są to cząstki elementarne – które same w sobie nie są słodkie, gorzkie, gorące, chłodne ani kolorowe. Te wrażenia, sugeruje, są silnie przekształconymi opakowaniami prezentującymi jedynie ogólne podsumowanie tego, co dzieje się na głębszym poziomie, na którym istnieją tylko cząstki elementarne zachowujące się zgodnie z obowiązującymi je prawami. Jednak zwracając uwagę na to, jakich własności cząstki elementarne nie mają – a przynajmniej jakich mieć nie muszą – Demokryt stawia inne, wielkie i wspaniałe pytanie o to, jakie własności faktycznie *mają* takie cząstki.

Wydaje się, że sam Demokryt odpowiada na nie, stwierdzając, że cząstki elementarne nie mają żadnych innych właściwości poza kształtem i ruchem. Jego cząstki przybierały postać sztywnego obiektu z haczykami. Owe haczyki pozwalały wyjaśnić, w jaki sposób cząstki łączą się ze sobą, tworząc ciała stałe lub innego rodzaju substancje. Demokryt wysunął postulat, że cząstki elementarne znajdują się w spontanicznym ruchu – że nieustannie „lawirują” – i mają preferowane położenie. W ten sposób powstaje naprężenie między niepokojem i pragnieniem osiągnięcia celu, dzięki czemu, zdaniem Demokryta, świat jest tak dynamicznym miejscem. (Ponieważ zachowało się tylko kilka fragmentów jego tekstów i dawnych komentarzy, nie możemy mieć pewności, co naprawdę myślał. Wydaje mi się jednak, że taki opis jest bliski prawdy).

Współczesna nauka udziela odpowiedzi, która jest wprawdzie zupełnie inna pod względem szczegółów, ale nie mniej śmiała. Idzie jeszcze dalej w swojej prostocie. Co ważniejsze, o jej poprawności świadczą wyniki niezliczonych doświadczeń. Według naszej obecnej najlepszej wiedzy główne własności materii, z których można wyprowadzić wszystkie inne jej cechy, są następujące:

Masa
Ładunek
Spin

To wszystko.

Z filozoficznego punktu widzenia najważniejszą nauką płynącą z tego stwierdzenia jest świadomość, że istnieje tylko kilka podstawowych własności i to właśnie je możemy dokładnie zdefiniować i zmierzyć. Można jeszcze dodać, że tak jak przewidywał Demokryt, związek między podstawowymi własnościami – między głęboką strukturą rzeczywistości – a zwyczajnym wyglądem rzeczy jest dość odległy. Choć stwierdzenie, że pojęcia: „gorzkie”, „słodkie”, „gorące”, „zimne” i „kolorowe” są tylko „konwencjami”, wydaje mi się zbyt radykalne, to niewątpliwie prześledzenie ich – i ogólnie rzecz biorąc, wszystkich wrażeń, których doświadczamy na co dzień – do ich źródła w masie, ładunku i spinie wymaga ogromnego wysiłku.

Szczegółowe omówienie masy i ładunku, obejmujące zarówno ładunek elektryczny, jak i ładunek kolorowy, można znaleźć w dodatku. Tutaj powiemy tylko trochę więcej o spinie, który jest chyba najmniej znaną własnością.

Każdy, kto kiedykolwiek bawił się żyroskopem, bardzo szybko zrozumie pojęcie spinu cząstek elementarnych. Podstawowa idea jest bowiem w tym przypadku taka, że spin[17] cząstek jest idealnym, pozbawionym tarcia żyroskopem, który nigdy się nie zatrzymuje.

W odniesieniu do żyroskopów najbardziej intrygujące jest to, że poruszają się w sposób, który kłóci się z naszym codziennym doświadczeniem. Mówiąc konkretnie, szybko obracający się żyroskop stawia opór, gdy próbujemy zmienić jego oś obrotu. Jeśli nie zadziałamy dużą siłą, ustawienie jego osi nie ulegnie większej zmianie. Możemy powiedzieć, że żyroskop ma bezwładność kierunkową. Efekt ten wykorzystują piloci samolotów i statków kosmicznych, w których montuje się żyroskopy pozwalające ustalić aktualny kierunek lotu.

Im szybciej obraca się dany żyroskop, tym silniej będzie się opierał wszelkim próbom zmiany jego ułożenia. Porównując przyłożoną siłę z reakcją żyroskopu, możemy zdefiniować wielkość, która będzie miarą bezwładności kierunkowej. W fizyce wielkość tę nazywa się momentem pędu. Duże, szybko obracające się żyroskopy mają duży moment pędu i nieznacznie tylko reagują na działanie sił zewnętrznych.

Cząstki elementarne są bardzo małymi żyroskopami. W związku z tym ich moment pędu jest *bardzo* mały. Gdy moment pędu przyjmuje wartość tak małą jak w przypadku cząstek elementarnych, wkraczamy w obszar fizyki kwantowej. W mechanice kwantowej bardzo często okazuje się, że wielkości uważane do tej pory za ciągłe tak naprawdę występują w niewielkich, niepodzielnych jednostkach, które nazywamy *kwantami*. (Właśnie od tego słowa wywodzi się nazwa całej dziedziny). Nie inaczej jest w przypadku momentu pędu. Z mechaniki kwantowej wynika, że istnieje pewne teoretyczne minimum wartości momentu pędu, jaką może mieć dany obiekt. Wszystkie możliwe momenty pędu są całkowitymi wielokrotnościami tej minimalnej jednostki.

Jak się okazuje, elektrony, kwarki i niektóre cząstki elementarne innego rodzaju mają właśnie taką wartość momentu pędu, jaka odpowiada tej teoretycznej minimalnej jednostce. Fizycy wyrażają ten fakt, stwierdzając,

że elektrony i inne tego typu cząstki mają spin ½. (Istnieje pewien interesujący matematyczny powód, dla którego przyjmuje się, że podstawowa jednostka spinu wyraża się liczbą ½, a nie 1, ale wyjaśnienie tej konwencji wykracza poza zakres naszej książki).

Zanim zakończymy to krótkie omówienie spinu, chciałbym się podzielić osobistym doświadczeniem. Spin odmienił moje życie. Zawsze lubiłem matematykę i łamigłówki, a w dzieciństwie uwielbiałem bawić się bąkami. Na studiach zrobiłem najpierw licencjat z matematyki. Podczas ostatniego semestru mojej nauki na Uniwersytecie Chicagowskim doszło do protestów studenckich i życie na kampusie niespodziewanie stanęło na głowie. Zajęcia były improwizowane i do pewnego stopnia nieobowiązkowe. Peter Freund, słynny profesor fizyki, zaproponował, że poprowadzi zaawansowany kurs poświęcony zastosowaniom symetrii matematycznej w fizyce. Wykorzystałem okazję, by chodzić na jego zajęcia, mimo iż nie miałem jeszcze odpowiedniego przygotowania.

Profesor Freund pokazał nam przykłady niezwykle pięknych wyrażeń matematycznych bazujących na idei symetrii, które w sposób bezpośredni prowadzą do uzyskania konkretnych przewidywań na temat zachowania obiektów fizycznych. Gdy o tym opowiadał, z jego rozszerzonych oczu bił niekłamany entuzjazm graniczący z zachwytem. Na mnie największe wrażenie zrobił pokazany na zajęciach przykład związku matematyki z kwantową teorią momentu pędu – w dalszym ciągu uważam, że jest to coś wspaniałego. Gdy wirująca cząstka rozpada się na kilka innych kręcących się cząstek (do czego w świecie kwantowym dochodzi bardzo często), kwantowa teoria momentu pędu pozwala nam przewidzieć, jaki będzie związek między kierunkiem ruchu produktów tego rozpadu a ustawieniem ich osi obrotu. Aby uzyskać takie przewidywania, należy wykonać wiele żmudnych obliczeń, a zachowanie cząstek powstających w rozpadzie wcale nie jest oczywiste. Zdumiewające, że to się w ogóle udaje.

Możliwość doświadczenia głębokiej harmonii między dwoma zupełnie różnymi wszechświatami – między wszechświatem pięknych idei i wszechświatem obiektów fizycznych – była dla mnie swoistym duchowym przebudzeniem. Znalazłem swoje powołanie. Nigdy tego nie żałowałem.

*Filozofia właściwości*

Podkreślmy raz jeszcze, że najważniejszym i najbardziej niezwykłym faktem związanym z naszym triem własności – masą, ładunkiem i spinem – jest po prostu to, że jest ich tak niewiele. Jeśli w przypadku dowolnej cząstki elementarnej określimy wartość tych trzech własności, a także jej położenie i prędkość, to będziemy mieli jej pełny opis.

Jak bardzo różni się to od przedmiotów, które spotykamy na co dzień! Rzeczy, które widzimy wokół siebie, mają przeróżne własności: rozmiar, kształt, kolor, zapach, smak i wiele innych. A gdy opisujemy jakąś osobę, możemy określić jej płeć, wiek, osobowość, stan umysłu i mnóstwo innych zmiennych. Wszystkie te własności przedmiotów i ludzi wyznaczają ich mniej więcej niezależne cechy. Żaden podzbiór tych cech nie wystarcza do ustalenia pozostałych. Najwyraźniej występuje duży rozdźwięk między surową prostotą podstawowych składników i złożonością powstających z nich obiektów, tak jak podejrzewał Demokryt.

Jednak wbrew temu, co sądził Demokryt, nasze współczesne podstawowe składniki nie mają haczyków. Nie są nawet ciałem stałym. Choć dla wygody nazywamy je „cząstkami elementarnymi”, to jednak w rzeczywistości w ogóle nie są cząstkami. (To znaczy mają niewiele wspólnego z tym, co kojarzy nam się ze słowem „cząstka”). Odkryte przez nas podstawowe składniki nie mają ani własnego rozmiaru, ani kształtu. Jeśli będziemy się upierać, że musimy je sobie jakoś wyobrazić, to powinniśmy pomyśleć o pozbawionych struktury punktach, w których jest skupiona masa, ładunek i spin. Zamiast „atomów i próżni” mamy obecnie czasoprzestrzeń i właściwości.

## SZCZEGÓŁY

Nie wszystkie cząstki elementarne są sobie równe. Odgrywają różne role w naszym rozumieniu świata. Kilka z nich ma dominujące znaczenie dla naszego życia. Kilka kolejnych pełni ważną funkcję w astronomii i astrofizyce. Są jednak również takie, których rola w wielkim porządku rzeczy wciąż nie jest do końca jasna.

Innymi słowy, mamy cząstki konstrukcyjne, cząstki przemiany i cząstki dodatkowe. Wszystkie są jednakowo fascynujące w oczach fizyków i astronomów, ale cząstki konstrukcyjne są bez wątpienia najważniejsze, jeśli chodzi o zrozumienie naszego świata, dlatego teraz zajmiemy się właśnie nimi. Dodatkowe informacje na temat pozostałych cząstek można znaleźć w dodatku.

*Cząstki konstrukcyjne*

Mówiąc ogólnie, „zwyczajną materię” możemy zdefiniować jako ten rodzaj materii, z którego sami jesteśmy zbudowani i który najczęściej spotykamy w biologii, chemii, geologii i inżynierii. Jednym z niezaprzeczalnych osiągnięć współczesnej nauki jest to, że potrafimy zdefiniować zwyczajną materię w zupełnie inny, o wiele bardziej precyzyjny sposób, stwierdzając, że jest to materia, którą możemy zbudować z elektronów, fotonów, dwóch rodzajów kwarków – nazywanych zwyczajowo kwarkiem górnym i dolnym – oraz gluonów.

Zatem aby zbudować całą materię, z którą mamy do czynienia na co dzień i która tworzy nasze ciało, wystarczy użyć dokładnie pięciu rodzajów cząstek elementarnych. W dodatku cząstki te można opisać jednoznacznie za pomocą kilku przejrzystych własności.

Oto tabela zawierająca listę tych cząstek i ich własności:

| | **masa** | **ładunek elektryczny** | **ładunek kolorowy** | **spin** |
|---|---|---|---|---|
| elektron | 1 | –1 | nie | ½ |
| foton | 0 | 0 | nie | 1 |
| kwark *u* | 10* | 2/3 | tak | 1/2 |
| kwark *d* | 20* | –1/3 | tak | 1/2 |
| gluon | 0 | 0 | tak | 1 |

(Gwiazdki zostaną wyjaśnione w dalszej części książki).

Rozpocznijmy ten spis inwentarza od krótkiego przypomnienia „klasycznego” opisu atomu z początku XX wieku, który będziemy tu

stopniowo udoskonalać. W tym opisie atom składa się z niewielkiego jądra otoczonego obłokiem elektronów. Elektrony są powiązane z jądrem za pośrednictwem przyciągania elektrycznego. Jądro zawiera niemal całą masę atomu i cały jego dodatni ładunek elektryczny.

Jądro z kolei składa się z protonów i neutronów. Zarówno protony, jak i neutrony mają masę około 2000 razy większą od masy elektronu. Protony są obdarzone dodatnim ładunkiem elektrycznym o takiej wartości, że dodatni ładunek jednego protonu równoważy dokładnie ujemny ładunek jednego elektronu. Neutrony mają zerowy ładunek elektryczny. Zatem gdy liczba elektronów otaczających jądro jest równa liczbie znajdujących się w nim protonów, to atom jako całość ma zerowy ładunek elektryczny, czyli jest elektrycznie obojętny.

Elektrony są pierwszymi cząstkami elementarnymi, które udało się odkryć, i pod wieloma względami można je uważać za najważniejsze. Po raz pierwszy zostały wykryte w 1897 roku przez J.J. Thomsona. Thomson badał ładunki elektryczne – a w zasadzie metody wytwarzania sztucznego oświetlenia – w rurach „próżniowych”, z których usunięto większość powietrza. Rury nie były całkowicie puste w środku – w przeciwnym razie nie byłoby w nich żadnych elektronów – ale na tyle opróżnione, że znajdujące się tam cząstki miały trochę więcej miejsca do swobodnego poruszania się. (Obecnie wiemy, że po umieszczeniu rur zawierających niemal doskonałą próżnię w silnym polu elektrycznym – innymi słowy, po przyłożeniu wysokiego napięcia – dochodzi do „jonizacji” atomów, czyli oderwania od nich elektronów. Elektrony są obdarzone ładunkiem elektrycznym, poruszają się więc w silnym polu, a po drodze wytwarzają iskry). Przykładając różne pola elektryczne i magnetyczne, Thomson przyglądał się, jak bardzo zakrzywiają się różne fragmenty wyładowań. W ten sposób udało mu się zauważyć pewną szczególnie ważną składową powstających „błyskawic”. Składowa ta występowała we wszystkich wyładowaniach – to znaczy pojawiała się zawsze, bez względu na to, jaki gaz znajdował się w rurze – i zakrzywiała się w bardzo prosty sposób po włączeniu pola magnetycznego. Prawdę mówiąc, kształt tej „błyskawicy” zgadzał się doskonale z trajektorią, jaką można wyznaczyć z praw elektryczności i magnetyzmu, obliczając tor ruchu naładowanych, masywnych punktów o określonej wartości ładunku i masy. Thomson oczywiście od razu wysunął hipotezę, że te szczególne wyładowania

składają się cząstek mających taką właśnie masę i obdarzonych dokładnie takim ładunkiem. Tak w fizyce pojawiły się elektrony. Fakt, że strumienie elektronów występują we wszystkich wyładowaniach, bez względu na rodzaj użytego gazu, sugerował, iż cząstki te są podstawowym, powszechnie spotykanym elementem składowym materii.

Pionierskie prace Thomsona stały się inspiracją dla wielu innych badaczy. Niedługo potem, dzięki wyprawom w głąb natury materii, zrodziła się nowa gałąź techniki, która w dzisiejszym świecie jest po prostu wszechobecna – mam oczywiście na myśli elektronikę. Wprost trudno byłoby przecenić jej znaczenie.

Zachowanie elektronów badano na wiele różnych sposobów w różnorakich doświadczeniach. Jak wspomnieliśmy wcześniej, uczeni zmierzyli na przykład maleńkie pola magnetyczne wytwarzane przez wirujące elektrony – czyli w istocie wszystkie elektrony. Wartość tego pola można wyznaczyć teoretycznie, przyjmując hipotezę, że elektrony mają wyłącznie masę, ładunek elektryczny i spin. Teoretycy potrafią wyliczyć tę spodziewaną wartość z bardzo dużą dokładnością, a fizycy doświadczalni mają przyrządy pozwalające mierzyć pola magnetyczne z równie dużą precyzją – w obu przypadkach jest to dokładność rzędu jednej dziesięciomilionowej procent. Na szczęście obie wartości są zgodne.

Za każdym razem gdy mówimy, że elektrony są cząstkami elementarnymi, powołujemy się właśnie na tę dokładną zgodność między przewidywanym zachowaniem wyidealizowanego, prostego modelu elektronu a wynikami doświadczeń. Gdyby elektrony, jak atomy, miały znaczącą strukturę wewnętrzną, to nie zachowywałyby się tak prosto. Gdyby na przykład ładunek elektronu był rozmieszczony jednorodnie w objętości maleńkiej kuli, a nie skupiony w jednym punkcie, to przewidywana wartość pola magnetycznego byłaby inna i nie zgadzałaby się już z wynikami pomiarów. (Oczywiście, gdyby ta kulka była odpowiednio mała, to różnica mogłaby być niezauważalna. Możemy jednak z całą pewnością stwierdzić, że Natura nie zachęca nas do wprowadzenia takiej komplikacji).

Takie samo uzasadnienie możemy przedstawić w odniesieniu do każdej cząstki elementarnej, którą będziemy omawiali. Cząstki te mogą się posługiwać tytułem „elementarna” dopóty, dopóki ktoś nie wykaże, że na to nie zasługują. Mają do tego prawo, ponieważ z tytułem tym wiążą się

surowe wymagania – a mianowicie to, że mogą mieć tylko kilka własności – o ściśle określonych konsekwencjach – i wszystkie te cząstki je spełniają.

W tabeli przedstawiającej cząstki elementarne i ich własności przyjąłem, że masa elektronu jest jednostką pozwalającą określić masy wszystkich pozostałych cząstek, dlatego niejako z definicji jego masa wynosi 1. Przyjąłem też, zgodnie z konwencją obowiązującą w fizyce, że jego ładunek elektryczny jest standardową jednostką ładunku. Jednak jeden z moich osobistych bohaterów, Benjamin Franklin, wprowadził pewną komplikację, która zaburza nieco ten prosty obraz. Zanim został znanym mężem stanu i dyplomatą, Franklin prowadził ważne badania, które przyczyniły się do rozwoju nowej nauki o elektryczności. Odkrył między innymi prawo zachowania ładunku i udowodnił, że ładunki elektryczne występują w dwóch odmianach: dodatniej i ujemnej.

Ponieważ był pierwszy, mógł wybrać, który ładunek należy oznaczyć symbolem minus, a który znakiem plus. Zdecydował, że ten gromadzący się na powierzchni szkła potartego kawałkiem jedwabiu będzie nazywany ładunkiem dodatnim. Działo się to na długo przed tym, zanim uczeni dowiedzieli się o istnieniu elektronów. Niestety, tak się niefortunnie złożyło, że zgodnie z wyborem dokonanym przez Franklina ładunek elektronu jest ujemny. Teraz jest już za późno, by zmieniać tę konwencję, ponieważ jest używana w tysiącach książek, artykułów naukowych i diagramów obwodów elektrycznych. Zatem ładunek elektryczny elektronu w naszej tabeli musi mieć wartość –1.

Kolejnymi cząstkami elementarnymi, które zaobserwowano, były fotony. Istnienie światła „odkryły” już zwierzęta – a można nawet powiedzieć, że i rośliny – na długo przed pojawieniem się ludzi. Jednak fakt, że światło występuje w postaci dyskretnych jednostek, poznano dopiero dzięki wysunięciu śmiałej hipotezy teoretycznej. Tymi podstawowymi jednostkami światła są właśnie fotony.

Einstein pierwszy przedstawił taką propozycję w swoim „cudownym roku”, czyli w roku 1905, tym samym, w którym ogłosił szczególną teorię względności, udowodnił istnienie atomów (badając ruchy Browna) i zapisał słynny wzór $E = mc^2$. Swoją teorię nazwał hipotezą kwantów światła. (Słowo „foton” pojawiło się dopiero później, w 1925 roku, za sprawą wybitnego chemika Gilberta Lewisa). Była to rewolucyjna propozycja, która początkowo została bardzo źle przyjęta. Osiem lat później, w 1913

roku, kończąc entuzjastyczną rekomendację dotyczącą przyjęcia Einsteina do grona członków Pruskiej Akademii Nauk, Max Planck przepraszał za żenującą absurdalność niektórych pomysłów młodego uczonego, pisząc: „Tego, że czasami myli się w swych spekulacjach, na przykład wysuwając hipotezę o kwantowej naturze światła, nie można mu zbytnio wyrzucać […]”[18].

Na ironię zakrawa fakt, że propozycja Einsteina była oparta na pracach Plancka. To właśnie Planck wymyślił koncepcję, że światło jest wysyłane i pochłanianie w paczkach, ponieważ taki model pasował do doświadczeń, w których mierzy się światło bijące od ogrzanych ciał (tak zwane promieniowanie ciała doskonale czarnego). Einstein uznał, że wyniki tych doświadczeń są dowodem na to, iż światło składa się z paczek, kropka. Wykorzystując swoją nieco ściślej określoną interpretację, wysunął również przewidywania odnośnie do wyników kilku innych możliwych doświadczeń. Wymyślone przez niego eksperymenty były bardzo trudne do wykonania za pomocą przyrządów dostępnych w 1905 roku. Dopiero w roku 1914 – rok po napisaniu przez Plancka wspomnianego listu – Robert Millikan przeprowadził doświadczenie, które jednoznacznie potwierdziło poprawność hipotezy Einsteina.

Choć Einstein z pewnością zasłużył na kilka Nagród Nobla, to otrzymał tylko jedną, w 1921 roku, właśnie za prace poświęcone kwantowej naturze światła. Sam uważał, że było to jego najbardziej przełomowe dzieło.

Gdy badamy zachowanie materii o energii dużo większej od tej, jaka była możliwa do osiągnięcia na początku XX wieku, zaczynają się pojawiać pojedyncze fotony obdarzone znaczącą energią i pędem. W takiej postaci można dużo łatwiej dostrzec w nich cząstki. Fotony o wysokiej energii są znane jako promienie gamma. Jeśli włączymy licznik Geigera, to usłyszymy charakterystyczne cyknięcia oznajmiające przybycie kolejnych promieni gamma.

Fotony powinniśmy zaliczyć, razem z elektronami i jądrami atomowymi, do składników atomów. Prawdę mówiąc, fotony są pierwszymi „sklejającymi” cząstkami, jakie poznaliśmy. To właśnie one, w swoim zbiorowym wcieleniu w postaci pola elektrycznego, łączą atomy w całość, wiążąc elektrony z jądrem.

Protony i neutrony nie są cząstkami elementarnymi. Okazuje się, że ich zachowanie jest zbyt złożone, by można je było w ten sposób opisać.

Obowiązujący obecnie model protonów i neutronów nie jest skomplikowany, ale jego odkrycie i udowodnienie jego poprawności nie było wcale łatwe. W ogólnym zarysie jest podobny do modelu z teorii atomów. Dwa rodzaje cząstek przypominających elektrony – zwane kwarkami górnymi (i oznaczane literą *u* od ang. *up*) i dolnymi (litera *d* od ang. *down*) – łączą się ze sobą za sprawą przypominających fotony cząstek, które nazywamy gluonami (od ang. *to glue* – sklejać).

Choć podstawowa idea jest podobna, występuje kilka istotnych różnic między budową atomów (złożonych z elektronów, fotonów i jądra) i protonów (które składają się z kwarków i gluonów).

• Oddziaływania silne, reagujące na inny rodzaj ładunku, nazywany ładunkiem kolorowym, są o wiele mocniejsze od oddziaływań elektromagnetycznych, które reagują na ładunek elektryczny. Właśnie dlatego jądra atomowe, tworzące zwarte struktury utrzymujące się w całości za sprawą oddziaływania silnego, są dużo mniejsze od atomów.

• Elektrony zawsze się wzajemnie odpychają, natomiast siły działające na kwarki są bardziej skomplikowane, ponieważ ładunek kolorowy występuje w trzech odmianach. Ta istotna różnica sprawia, że kwarki czasami się przyciągają. Dzięki tej możliwości kwarki – w przeciwieństwie do elektronów – mogą się ze sobą łączyć bez konieczności istnienia jakiegoś „jądra” zbudowanego z czegoś innego.

• Fotony są elektrycznie obojętne – to znaczy mają zerowy ładunek elektryczny – natomiast ich odpowiedniki w oddziaływaniu silnym, czyli gluony, nie mają zerowego ładunku kolorowego. Gluony są podatne na wpływ oddziaływania silnego w takim samym stopniu jak kwarki (a prawdę mówiąc, nawet większym). To kolejny powód, dla którego protony i neutrony są bardziej jednolite niż atomy – wynika to z faktu, że nośniki siły sklejającej te cząstki w całość same również podlegają jej wpływowi.

Aby uzupełnić nasz opis kwarków i gluonów, musimy jeszcze powiedzieć coś o ich masach[19]. W przypadku gluonów sprawa jest prosta – podobnie jak fotony, gluony mają zerową masę. Jeśli natomiast chodzi o kwarki, to powinniśmy zapamiętać, że mimo iż ich masa jest względnie duża w porównaniu z masą elektronu, to jednak jest bardzo mała, gdy porówna się ją z masą protonu czy neutronu.

Może się wydawać paradoksalne, że masa protonów jest dużo większa od całkowitej masy obiektów, z których są zbudowane. Aby wyjaśnić tę rozbieżność, uczeni prowadzili badania, które zaowocowały największym osiągnięciem w historii naszych wysiłków mających na celu zrozumienie Natury. Dzięki tym badaniom dowiedzieliśmy się, że źródłem naszej masy jest energia. Więcej na ten temat powiemy w następnym rozdziale.

Trudno wyznaczyć dokładne masy kwarków *u* i *d*, ponieważ odróżnienie wpływu tych mas od innych, bardziej znaczących efektów jest dość skomplikowane. Właśnie dlatego w tabeli umieściliśmy gwiazdki obok wartości będących najlepszym oszacowaniem mas tych cząstek.

Do listy cząstek konstrukcyjnych powinniśmy dodać jeszcze grawiton. Chodzi o cząstkę, z której zbudowane są pola grawitacyjne. Fotony łączą ze sobą atomy i cząsteczki; gluony sklejają kwarki, protony i jądra atomowe; grawitony wiążą planety, gwiazdy, galaktyki i, ogólnie rzecz biorąc, duże obiekty.

| | **masa** | **ładunek elektryczny** | **ładunek kolorowy** | **spin** |
|---|---|---|---|---|
| grawiton | 0 | 0 | nie | 2 |

Grawitonów nie udało się jeszcze wykryć jako pojedynczych cząstek, ponieważ ich oddziaływania ze zwyczajną materią są zbyt słabe, by można je było bezpośrednio zaobserwować. Widzimy jednak działanie sił grawitacyjnych – a ostatnio wykryliśmy również fale grawitacyjne. Z punktu widzenia teorii te obserwowalne efekty są wynikiem sumarycznego oddziaływania wielu pojedynczych grawitonów.

Każda z wymienionych własności grawitonu ma jasny związek z wyraźnie widocznymi cechami siły, którą cząstki te wytwarzają, czyli z grawitacją. Ponieważ grawitony mają zerowy ładunek elektryczny i są pozbawione ładunku kolorowego, każdy pojedynczy grawiton bardzo słabo oddziałuje ze zwyczajną materią. Jednak dzięki ich zerowej masie można je tanio wytwarzać w ogromnej liczbie i tak powstają pola oraz fale grawitacyjne.

Względnie duża wartość spinu tych cząstek sugeruje, że ich oddziaływania są nieco bardziej złożone niż w przypadku pozostałych cząstek elementarnych. Faktycznie, można wykazać, że główne cechy teorii

grawitacji przedstawionej przez Einsteina, czyli ogólnej teorii względności, wynikają w sposób bezpośredni z własności grawitonu związanych z ich spinem. Fakt ten stanowi wspaniały dowód na to, że nasze trzy podstawowe własności materii – masa, ładunek i spin – w zupełności wystarczają do pełnego wyjaśnienia jej zachowania. Einstein doszedł do ogólnej teorii względności inną drogą, która świadczy o jego niewiarygodnym geniuszu, ale była ona bardziej okrężna.

W ten sposób zakończyliśmy omówienie cząstek konstrukcyjnych. Jeśli ktoś po raz pierwszy zetknął się z tymi pojęciami, to niezwykłość przedstawionych tu idei i sposób ich realizacji w Naturze może przyprawiać o zawrót głowy. Podstawowe przesłanie powinno być jednak jasne: świat fizyczny jest zbudowany z niewielkiej liczby różnych składników. Co więcej, składniki te są idealnie proste, co oznacza, że mają tylko kilka własności.

## PRZYSZŁOŚĆ SKŁADNIKÓW

Lista cząstek elementarnych jest wyraźnie krótsza niż alfabet i o wiele krótsza od układu okresowego pierwiastków. Razem z prawami opisującymi oddziaływania – których jest tylko cztery – ta lista składników tworzy wspaniały, poprawnie działający opis materii. Wszystko to omówimy w następnym rozdziale. Tam również przedstawimy fascynujące wskazówki i pomysły, które sugerują, że ten i tak zwarty już opis może ulec jeszcze większemu skróceniu.

Zanim jednak się tym zajmiemy, zastanówmy się nad przyszłością składników służących do budowy świata, spoglądając na nie z innej, bardziej praktycznej perspektywy. Rozważymy tu dwie intrygujące strategie wykorzystania nowych „cząstek elementarnych”. Inspiracją do wymyślenia obu tych koncepcji było działanie Natury. Pierwsza strategia, bazująca na fizyce, działa w kierunku z zewnątrz do środka. Druga, wykorzystująca biologię, rozwija się w kierunku ze środka na zewnątrz.

*Cząstki zaprojektowane, ujęcie 1: wspaniałe nowe światy*

Analizując materiały, możemy się posługiwać takimi samymi pojęciami jak te, których używamy do opisu świata jako całości. Jeśli wstrzykniemy do materiału odrobinę energii, ładunku elektrycznego lub spinu, to powstanie zaburzenie, które w ogólnym przypadku przekształci się do postaci kilku grudek, czyli kwantów. Takie wprowadzone z „zewnątrz" grudki, zwane kwazicząstkami, mogą mieć inne własności niż cząstki elementarne występujące w pustej przestrzeni.

*Dziury* są prostą, ale niezwykle ważną klasą kwazicząstek. W środku typowego ciała stałego znajduje się wiele elektronów. Gdy nie jest ono zaburzone, czyli gdy znajduje się w stanie równowagi, elektrony układają się w pewien określony wzór. Wyobraźmy sobie teraz, że wyjmujemy jeden z elektronów. Powstaje wówczas stan z jednym pustym miejscem, w którym „powinien" być elektron. Gdy sytuacja wewnątrz takiego materiału się ustabilizuje, co może nastąpić bardzo szybko, najczęściej pojawia się w nim jedna kwazicząstka, która – ponieważ powstała jako reakcja na nieobecność elektronu – ma ładunek +1 (przypomnijmy, że ładunek elektronu wynosi –1). Nazywamy ją dziurą.

Dziury są dodatnio naładowanymi (kwazi)cząstkami, które charakteryzują się tym, że są o wiele lżejsze i łatwiejsze w użyciu niż ich najbliższe odpowiedniki istniejące w pustej przestrzeni, czyli protony. Odgrywają kluczową rolę w tranzystorach i, ogólnie rzecz biorąc, we wszystkich nowoczesnych układach elektronicznych. Odkrycie możliwości wytwarzania i wykorzystywania dziur całkowicie odmieniło świat.

W innych przypadkach kwazicząstki wywodzą się bezpośrednio z cząstek elementarnych pustej przestrzeni, ale po umieszczeniu ich w środku materiału zaczynają przejawiać wyraźnie inne własności niż w pustej przestrzeni. Doskonałym przykładem takiego procesu jest nadprzewodnictwo. Gdy fotony trafiają do nadprzewodnika, ich zerowa masa ulega zmianie i przyjmuje bardzo małą, ale jednak niezerową wartość. (Dokładna wartość tej masy zależy od rodzaju nadprzewodnika, ale w typowym przypadku jest to jedna milionowa masy elektronu). Fizycy zajmujący się zawodowo tą dziedziną powiedzieliby zapewne, że fakt, iż fotony uzyskują masę, jest istotą nadprzewodnictwa.

Na samym początku mojej kariery skupiałem się w badaniach na cząstkach elementarnych w tradycyjnym znaczeniu tego słowa. Natomiast znacznie wcześniej, podczas wycieczki szkolnej do Laboratoriów Bella, usłyszałem coś, co zapadło mi w pamięć i ostatecznie odmieniło moje życie. W trakcie tej wizyty wysłuchaliśmy wystąpienia jednego z pracujących tam uczonych, który próbował nam wyjaśnić, czym się zajmuje, i wspomniał, że fotony są kwantami drgań. Nie rozumiałem, o co mu chodzi, ale pomyślałem sobie, że to najwspanialsza rzecz, jaką kiedykolwiek usłyszałem – trzy dziwne pojęcia o frapujących nazwach w jakiś sposób połączone w jedno. W drodze powrotnej do domu łamałem sobie nad tym głowę i doszedłem do przekonania, że uczony z Laboratoriów Bella chciał nam w ten sposób przekazać, iż materiały przypominają niezależne światy, zupełnie inne od naszego, w których istnieją specyficzne rodzaje cząstek. Bardzo mi się ten pomysł spodobał.

Wymyślanie nowych rodzajów cząstek elementarnych wymaga dużo czasu. Wszystkie cząstki, które do tej pory omówiliśmy, a także te wymienione w dodatku były dobrze znane albo przewidywane z dużym prawdopodobieństwem już w latach siedemdziesiątych XX wieku. Z kolei świat kwazicząstek stanowi ogromne pole do popisu dla wyobraźni i kreatywności. Patrząc z perspektywy czasu, mogę stwierdzić, że podczas tej szkolnej wycieczki udało mi się po raz pierwszy dostrzec nowe horyzonty.

Piętnaście lat później w końcu do nich dotarłem. W tym miejscu przedstawię tylko jeden przykład. *Eniony* są kwazicząstkami obdarzonymi pewnym prostym rodzajem pamięci. Wymyśliłem je w 1982 roku i wtedy też nadałem im tę nazwę. Na samym początku były to czysto teoretyczne rozważania. Chciałem udowodnić, że kwazicząstki mogą mieć dodatkową własność w postaci niewielkiej pamięci. (Później dowiedziałem się, że dwaj norwescy fizycy, Jon Magne Leinaas i Jan Myrheim, już wcześniej rozważali podobne idee). Na tym etapie nie miałem na myśli żadnego konkretnego materiału.

Kilka miesięcy później usłyszałem jednak o odkryciu tak zwanego ułamkowego kwantowego zjawiska Halla[20]. W materiałach, w których występuje to zjawisko, wstrzyknięty elektron dzieli się na kilka kwazicząstek i każda z nich przejmuje pewien ułamek jego ładunku elektrycznego. Uświadomiłem sobie wtedy, że między takimi

kwazicząstkami muszą działać bardzo dziwne siły, i zacząłem podejrzewać, że mogą one być enionami. W 1984 roku udało mi się to udowodnić wspólnie z Danem Arovasem i J. Robertem Schriefferem.

Później eniony dostarczyły mi jeszcze dużo radości i wielu innych fizyków przyłączyło się do tej zabawy. Mieliśmy nadzieję, że eniony okażą się ważnymi elementami komputerów kwantowych, ponieważ ich pamięć można wykorzystać do przechowywania i przetwarzania informacji. Firma Microsoft sporo zainwestowała w badania, które miały do tego doprowadzić.

Fizycy i pomysłowi inżynierowie zaproponowali wiele innych, potencjalnie użytecznych nowych rodzajów kwazicząstek. Wszystkie mają urocze nazwy, takie jak spinony, plazmony, polarytony, fluksony i – moja ulubiona – ekscytony. Niektóre nadają się do przechwytywania energii promieniowania, inne natomiast są świetne w przenoszeniu energii z miejsca na miejsce. Gdyby udało się połączyć obie te zalety, moglibyśmy zaprojektować wydajne systemy do przechwytywania energii słonecznej.

Wspaniałe nowe materiały z niezwykłymi kwazicząstkami będą odgrywały coraz większą rolę w inżynierii materiałowej. Uczeni zajmujący się prężnie rozwijającą się dziedziną metamateriałów projektują coraz więcej takich substancji.

Gdy już zaczniemy wyobrażać sobie materiały jako substancje, w których przebywają kwazicząstki, wystarczy zrobić tylko niewielki kolejny krok, by zadać bardzo ważne pytanie: czy możemy powiedzieć, że sama „pusta przestrzeń” również jest materiałem, którego kwazicząstkami są nasze „cząstki elementarne”? Możemy i powinniśmy! Jak się przekonamy w dalszych rozdziałach, jest to bardzo owocny tok rozumowania.

### *Cząstki zaprojektowane, ujęcie 2: inteligentne materiały*

Biologia sugeruje inny kierunek zmian własności materii w przyszłości. Komórki są „cząstkami elementarnymi” złożonych form życia. Występują w różnych kształtach i rozmiarach, ale wszystkie mają ten sam zasób sztuczek, dzięki którym mogą pełnić funkcję magazynu informacji i fabryki chemicznej. Są również wyposażone w skomplikowany interfejs do komunikacji ze światem zewnętrznym, który pozwala im gromadzić zasoby i wymieniać się informacją.

Komórki biologiczne w żadnym razie nie są prostymi obiektami fizycznymi. Zbudowanie od podstaw sztucznych komórek pełniących wszystkie podstawowe funkcje komórek biologicznych jest ogromnym wyzwaniem. Gdyby to się komuś udało, zyskalibyśmy możliwość konstruowania urządzeń przypominających komórki, którymi moglibyśmy uzupełniać ubytki po tych zniszczonych chorobą lub obumarłych w wyniku starzenia się organizmu. Otwarłyby się również przed nami zupełnie nowe możliwości, takie jak trawienie toksycznych produktów przemiany materii i przekształcanie ich do postaci niegroźnych lub wręcz użytecznych substancji. Bardziej praktyczna strategia krótkoterminowa, stosowana obecnie z coraz większym powodzeniem przez wielu biologów molekularnych, polega na zmienianiu istniejących komórek.

Możemy czerpać inspirację z biologii, ale nie w sposób dosłowny. Samochody nie są przecież ulepszonymi końmi, a samoloty – poprawionymi ptakami. Nikt też nie twierdzi, że użyteczne roboty muszą przypominać ludzi. Najbardziej charakterystyczną cechą komórek biologicznych, która do tej pory nie ma swojego odpowiednika wśród wytworów ludzkiej techniki, jest możliwość rozmnażania się z jednoczesnym wprowadzaniem zmian. W odpowiednim, możliwie sprzyjającym środowisku komórki gromadzą substancje potrzebne do wytworzenia nowych komórek, które będą ich bardzo zbliżonymi, ale jednak nie dokładnymi kopiami. Pojawiające się różnice nie są przypadkowe, lecz wynikają z realizacji programu zapisanego w samej komórce.

Rozmnażanie niesie ze sobą możliwość wzrostu wykładniczego. Jeśli zaczniemy od jednej komórki i założymy, że w każdym kroku ich liczba się podwaja, to po dziesięciu pokoleniach będziemy mieli ponad tysiąc komórek, a po mniej więcej czterdziestu będą ich miliardy – to już wystarcza do zbudowania ludzkiego ciała. Zaprogramowane zróżnicowanie – czyli modulacja – może prowadzić do powstania wyspecjalizowanych komórek (i faktycznie tak się dzieje), które nadają się do pełnienia różnych funkcji, tak jak to jest w przypadku komórek mięśniowych, komórek krwi i neuronów.

Wydaje się, że nic nie stoi na przeszkodzie, by taką potężną strategię rozmnażania się ze zmianami udało się zastosować wśród sztucznych obiektów, które są przecież zdecydowanie prostsze od komórek

biologicznych, szczególnie jeśli są przeznaczone do pełnienia mniej skomplikowanych i nie tak subtelnych funkcji jak tworzenie organizmów żywych. Tego rodzaju urządzenia doskonale nadawałyby się do realizacji projektów zakrojonych na szeroką skalę, takich jak przystosowywanie planet do potrzeb ludzi lub budowa gigantycznych komputerów wielkości góry, ponieważ wymaga to tworzenia struktur, które są bardzo powtarzalne i niezbyt zróżnicowane pod względem szczegółów konstrukcyjnych. Modulowane samopowielanie otwiera przed nami tak duże możliwości, że jestem przekonany, iż tego typu procesy odegrają ważną rolę w inżynierii przyszłości.

15 R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *Feynmana wykłady z fizyki*, tom 1, część 1, przeł. Zofia Królikowska, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2007, s. 21 (przyp. tłum.).

16 W tym miejscu, podobnie jak Newton, wybiegamy nieco w przyszłość i opisujemy pojęcia, które będą głównym tematem rozdziału 4.

17 Nazwa „spin” pochodzi od angielskiego czasownika *to spin* – wirować (przyp. tłum.).

18 Cyt. za: Abraham Pais, *Pan Bóg jest wyrafinowany…*, przeł. Piotr Amsterdamski, Prószyński i S-ka, Warszawa 2001, s. 386 (przyp. tłum.).

19 Kwarki mają również niezerowy ładunek elektryczny. Właśnie jego wartość jest cechą odróżniającą oba rodzaje kwarków – kwark *u* ma ładunek elektryczny równy 2/3, natomiast w przypadku kwarka *d* wartość ładunku elektrycznego wynosi –1/3. Protony składają się z dwóch kwarków *u* i jednego *d*, a zatem ich ładunek elektryczny jest równy 2/3 + 2/3 – 1/3 = 1. Neutrony powstają natomiast z jednego kwarka *u* i dwóch kwarków *d*, mają więc ładunek elektryczny równy 2/3 – 1/3 – 1/3 = 0.

20 W 1998 roku Robert Laughlin, Horst Störmer i Dan Tsui otrzymali za to odkrycie Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki.

# 4

# Istnieje tylko kilka praw

Sposób działania podstawowych[21] praw fizyki jest zupełnie inny od tego, jak działają prawa stanowione przez ludzi. Istnieje wiele praw wprowadzonych przez człowieka i są one różne w różnych miejscach, a także zmieniają się z upływem czasu. Ludzkie prawa przewidują różne możliwości zachowania się poszczególnych osób i proponują, jakie działania należy podjąć w każdym przypadku. Tego typu prawa nie pozwalają na konstruowanie długich logicznych wywodów prowadzących do jednoznacznego wniosku, a w dodatku poszczególni eksperci mają często różną opinię na temat ich znaczenia.

Podstawowe prawa fizyki różnią się od ludzkich praw pod każdym tym względem. Jest ich zaledwie kilka i są zawsze i wszędzie takie same. Prawa fizyczne opisują po prostu, co się wydarzy. Zapisuje się je w postaci równań matematycznych zawierających dokładnie zdefiniowane wielkości, dzięki czemu nie ma w nich miejsca na niejednoznaczność, a znający się na rzeczy eksperci nigdy nie będą wygłaszali sprzecznych opinii. Aby ustalić, co z nich wynika, trzeba jedynie przeprowadzić odpowiednie obliczenia. Można nawet zaprogramować komputer, by to za nas robił.

Dziecięce wyobrażenie o tym, jak działa świat, które większość z nas zabiera ze sobą w dorosłe życie, bardziej przypomina model praw ludzkich niż idealne prawa fizyki. W sposób bezpośredni doświadczamy konsekwencji rozważania różnych możliwości i dokonywania wyborów. Odnosimy wrażenie, że wyniki naszych przemyśleń wprowadzają zmianę w świecie fizycznym. W szczególności czujemy, że myśli kontrolują ruch naszego ciała. Formułujemy oczekiwania odnośnie do tego, jak powinni się zachowywać inni ludzie i poszczególne obiekty, posługując się przy tym najczęściej „zdrowym rozsądkiem”, a tylko w wyjątkowych sytuacjach

wykorzystujemy logiczne myślenie i obliczenia. Nikt przecież nie chodzi, nie jeździ na rowerze ani nie łapie piłki dzięki temu, że wykonał obliczenia bazujące na zasadach dynamiki Newtona, nie mówiąc już o kwantowej teorii materii.

Aby osiągnąć zrozumienie świata na poziomie podstawowym, musimy na nowo przeanalizować nasze doświadczenie i metody wywiedzione z dzieciństwa. Jedynie wtedy uda nam się przejść od praw ludzkich do praw fizyki.

## TRIUMF LOKALNOŚCI I SPLENDOR PÓL

*Matematyczne zasady filozofii naturalnej* Isaaca Newtona, wydane w 1687 roku, wprowadziły wspaniały formalizm opisu świata fizycznego, który odgrywał dominującą rolę w nauce aż do XIX wieku. W tym ujęciu prawa opisują, w jaki sposób ciała oddziałują na siebie za pośrednictwem sił. Modelowym przykładem udanego prawa fizyki stało się newtonowskie prawo powszechnego ciążenia. Według niego ciała przyciągają się siłą, która jest proporcjonalna do iloczynu ich mas i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu dzielącej je odległości.

Gdy uczeni zaczęli badać inne rodzaje sił – mówiąc konkretnie, oddziaływania elektryczne i magnetyczne – próbowali stosować ten sam podstawowy formalizm. Pierwsze wyniki były zachęcające. Prawo Coulomba opisujące siłę elektryczną jest na przykład wiernym odzwierciedleniem newtonowskiego prawa powszechnego ciążenia, w którym ładunek elektryczny zajął miejsce masy.

Metoda ta nie sprawdziła się jednak tak dobrze w odniesieniu do magnetyzmu. Okazało się, że oddziaływania magnetyczne zależą nie tylko od położenia, lecz także od prędkości, a w dodatku zależność ta wcale nie jest prosta. Później, gdy uczeni zaczęli badać sytuacje, w których działają jednocześnie siły elektryczne i magnetyczne, komplikacje zaczęły się mnożyć.

Michael Faraday (1791–1867), geniusz fizyki doświadczalnej, który był samoukiem z powodu swojego skromnego pochodzenia, nie radził sobie ze skomplikowanym opisem matematycznym złożonych praw opisujących

siły. Wymyślił więc na własny użytek metodę bazującą na diagramach. Wyobrażał sobie, że ciała oddziałujące elektrycznie i magnetycznie roztaczają wokół siebie sferę wpływu, przypominającą aurę lub atmosferę, nawet wtedy, gdy nie ma w pobliżu nich żadnych innych ciał, które mogłyby to odczuwać. Obecnie takie aktywne obszary przestrzeni nazywamy polami elektrycznymi i magnetycznymi. Faraday używał bardziej obrazowego języka, nazywając je „liniami sił”. Jak ujął to James Clerk Maxwell (1831–1879), niezmiernie utalentowany teoretyk, który ogromnie cenił Faradaya i był popularyzatorem jego dokonań: „Faraday oczyma umysłu widział linie sił przecinające całą przestrzeń tam, gdzie matematycy widzieli ośrodki sił przyciągające wszystko z odległości; Faraday widział ośrodek tam, gdzie oni nie dostrzegali nic poza odległością; Faraday starał się umiejscowić zjawiska w kontekście prawdziwych działań zachodzących w takim ośrodku”.

Stosując takie niestandardowe podejście, Faraday szybko odkrył niezwykłe zjawisko, które trudno było nawet opisać bez odwoływania się do pól. Mam na myśli prawo indukcji elektromagnetycznej, zgodnie z którym zmieniające się w czasie pola magnetyczne wytwarzają wirujące pola elektryczne. Dokonując tego odkrycia, udowodnił, że pola żyją własnym życiem.

Aby zrozumieć, jak wypełniający przestrzeń ośrodek może wytwarzać siły między odległymi ciałami, przestrzegając przy tym zasady lokalności działań, tak jak wyobrażał to sobie Faraday, możemy się posłużyć prostym przykładem wykorzystującym wodę. Gdy jakaś motorówka lub skuter wodny wytwarza zaburzenie na jeziorze, to jego wpływ rozszerza się stopniowo po całej tafli wodnej, ponieważ rozkołysana woda w jednym miejscu popycha wodę w swoim bezpośrednim sąsiedztwie – i *tylko* tam. Dlatego po pewnym czasie pływacy kąpiący się w jeziorze poczują działanie tej siły, nawet jeśli znajdują się daleko od jej źródła. Sam niejednokrotnie doświadczyłem tego denerwującego uczucia. Byłoby gorzej, gdyby zaburzenie wywołane przez motorówkę pojawiało się bez żadnego ostrzeżenia, ale zazwyczaj widzę zbliżającą się falę. Lokalność jest błogosławieństwem – oznacza, że takie przykre zdarzenia nie mogą być całkowicie niespodziewane.

Zaproponowana przez Faradaya wizja lokalności wywołała prawdziwą rewolucję w fizyce. Skoro pola elektromagnetyczne wypełniające

przestrzeń żyją własnym życiem, to należy je dodać do listy składników, z których zbudowany jest świat. Formalizm newtonowski, oparty na cząstkach istniejących w przestrzeni – nawiązujący do „atomów i próżni” Demokryta – przestał już wystarczać. Dzięki temu nasz opis świata znacznie się wzbogacił. Jak napisał Maxwell:

> Przepastne obszary międzyplanetarne i międzygwiazdowe nie będą już teraz postrzegane jako niewykorzystane zakątki Wszechświata, których Stwórca nie zechciał wypełnić symbolami różnorodnego porządku Swojego królestwa. Możemy się przekonać, że są wypełnione tym wspaniałym ośrodkiem; tak pełne, że żadna ludzka moc nie jest w stanie usunąć go z najmniejszego fragmentu przestrzeni ani wytworzyć najmniejszej skazy w jego nieskończonej ciągłości.

Jeśli natchniona proza Maxwella wydaje się nam przesadą, zastanówmy się, co sprawiło, że targały nim tak silne uczucia. Gdy na początku swojej kariery zajął się badaniem elektryczności i magnetyzmu, urzekły go idee i odkrycia Faradaya. Postanowił rozwijać intuicyjne pojęcie pola, którym posługiwał się Faraday, zamiast pozostawać w obrębie lepiej opracowanego i bardziej uznanego formalizmu newtonowskiego. Maxwell wysunął przypuszczenie, że

> za każdym razem gdy dochodzi do przesłania energii z jednego ciała do drugiego w pewnym odstępie czasu, musi istnieć jakiś ośrodek lub substancja, w której energia ta przebywa po opuszczeniu pierwszego ciała, a przed wniknięciem do drugiego. […] A jeśli dopuścimy istnienie takiego ośrodka jako hipotezę, to uważam, że powinien on zajmować poczesne miejsce w naszych badaniach i należy skonstruować pojęciowe odwzorowanie wszystkich szczegółów jego działania.

Opisawszy ten nowy punkt widzenia na gruncie matematyki, Maxwell odkrył, że otrzymane równania są spójne tylko pod warunkiem rozszerzenia prawa indukcji Faradaya o nowe prawo, w którym role pól elektrycznych

i magnetycznych są odwrócone. Maxwellowskie prawo indukcji głosi więc, że zmienne pola elektryczne wytwarzają wirujące pola magnetyczne.

Gdy Maxwell połączył ze sobą oba te prawa indukcji wykorzystujące pojęcie pola – wcześniejsze, Faradaya, i odkryte przez siebie drugie prawo – odkrył, że razem prowadzą one do powstania zdumiewającego nowego zjawiska. Umożliwiają wytwarzanie samopodtrzymujących się, trwałych i przemieszczających się w przestrzeni zaburzeń pól elektrycznych i magnetycznych. Zmienne pola elektryczne wytwarzają zmienne pola magnetyczne, które wytwarzają zmienne pola elektryczne, które z kolei wytwarzają zmienne pola magnetyczne i tak dalej. Te zaburzenia, jak obliczył, powinny się przemieszczać z prędkością światła, którą uczeni zmierzyli niezależnie już wcześniej. Natychmiast więc stwierdził: „Zgodność tych wyników zdaje się wskazywać, że światło i magnetyzm są przejawami tej samej substancji i że światło jest zaburzeniem elektromagnetycznym, które ulega propagacji w tym polu zgodnie z prawami elektromagnetyzmu”.

Miał rację.

Jednym z możliwych rodzajów zaburzeń elektromagnetycznych jest światło widzialne – chodzi o wszystkie fale o długości mieszczącej się w zakresie fal, na które reagują nasze oczy – ale nie jest to jedyna możliwość. Maxwell przewidział istnienie rozciągniętych i ściśniętych odmian światła widzialnego, w tym również nowe rodzaje promieniowania, które były całkowicie nieznane w jego czasach i nikt nie podejrzewał nawet, że mogą istnieć. Obecnie nazywamy je falami radiowymi, mikrofalami i promieniowaniem podczerwonym oraz promieniowaniem nadfioletowym, rentgenowskim i gamma.

Doświadczenie, które ostatecznie potwierdziło poprawność równań Maxwella, zostało wykonane dopiero ponad dwadzieścia lat po ich sformułowaniu. Aby je przeprowadzić, Heinrich Hertz zaprojektował i skonstruował pierwsze w historii nadajniki i odbiorniki fal radiowych. Za ich pomocą zamierzał przekształcić piękne idee w fizyczną rzeczywistość. Nie miał wątpliwości, że mu się to udało. „Trudno oprzeć się wrażeniu – pisał – że te matematyczne wzory żyją własnym życiem i są obdarzone inteligencją, że są od nas mądrzejsze, mądrzejsze nawet od swoich odkrywców, i że czerpiemy z nich więcej, niż w nie włożyliśmy”.

Faraday, Maxwell i Hertz prowadzili swoje prace przez większą część XIX stulecia. Dzięki nim udało się ustalić, że pola wypełniające przestrzeń są nowym rodzajem składnika w naszym podstawowym opisie świata.

*Siła i substancja: pola kwantowe*

Początkowo uważano, że pola są dodatkowym składnikiem w przepisie na fizyczny świat, swoistym uzupełnieniem cząstek. Jednak na przestrzeni XX wieku pola całkowicie zawładnęły fizyką. Obecnie postrzegamy cząstki jako przejaw głębszej, pełniejszej rzeczywistości. Uważamy, że są awatarami pól.

Jak już wspomnieliśmy, rozwijając prace Plancka, Einstein wysunął hipotezę, że światło występuje w dyskretnych paczkach – że jest zbudowane z cząstek, które on sam nazywał kwantami światła, a które obecnie są znane jako fotony. Społeczność fizyków początkowo przyjęła propozycję Einsteina dość chłodno, ponieważ wydawało się, że trudno będzie pogodzić ideę światła złożonego z cząstek z opisem światła przedstawionym przez Maxwella, który bazuje na pojęciu pola. Teoria Maxwella odnosiła liczne sukcesy, wśród których niemałe znaczenie miało epokowe odkrycie Hertza, a jej przewidywania znalazły potwierdzenie w szczegółowych badaniach nowych form promieniowania.

Pola, rozciągające się w sposób ciągły w całej przestrzeni, wydają się czymś zupełnie innym niż cząstki. Trudno było sobie wyobrazić, w jaki sposób światło mogłoby być i jednym, i drugim, ale wyniki doświadczeń kazały uczonym przyjąć taką hipotezę.

Różne aspekty światła – polowy i cząstkowy – można jednak uzgodnić, wprowadzając pojęcie pola kwantowego. Pola kwantowe, jak sugeruje ich nazwa, nadal są polami (to znaczy ośrodkiem wypełniającym przestrzeń). Istnieją kwantowe wersje zarówno pól elektrycznych, jak i magnetycznych. W takiej postaci nadal spełniają one te same równania – równania Maxwella – za pomocą których dziewiętnastowieczni fizycy opisali pola elektryczne i magnetyczne, zanim ktokolwiek usłyszał o mechanice kwantowej.

Jednak kwantowe wersje pól elektrycznych i magnetycznych można opisać za pomocą jeszcze innych, dodatkowych równań. Równania te są najczęściej znane pod odstraszającą nazwą „relacji komutacji”, ale my

będziemy się tu posługiwali mniej oficjalnym terminem „warunki kwantowe”. Bez względu na to, jak je nazwiemy, te dodatkowe równania wyrażają istotę teorii kwantowej w postaci zapisu matematycznego. Werner Heisenberg wprowadził ogólną ideę warunków kwantowych w 1925 roku, gdy miał zaledwie dwadzieścia cztery lata. Niedługo potem, w 1926 roku, Paul Dirac określił szczegółowe warunki kwantowe odnoszące się do pól elektrycznych i magnetycznych. Również on miał wtedy zaledwie dwadzieścia cztery lata.

Gdy musimy zapewnić zgodność z większą liczbą równań, otrzymujemy mniej rozwiązań. Jak już mówiliśmy, Maxwell odkrył, że światło jest pewnym rodzajem samopodtrzymującego się, przemieszczającego się pobudzenia pól elektrycznych i magnetycznych. Jednak nie wszystkie otrzymane przez niego rozwiązania spełniają warunki kwantowe. Takie akceptowalne rozwiązania musi jeszcze cechować ściśle określona zależność między energią i częstotliwością (to znaczy szybkością, z jaką drgają pola). Przedstawmy ten ważny związek zarówno słownie, jak i w postaci prostego równania. Wyrażając go słownie, powiemy, że rozwiązania muszą spełniać zależność polegającą na tym, iż energia wzbudzenia musi być równa wartości pewnej niezerowej stałej, tak zwanej stałej Plancka, pomnożonej przez częstotliwość. W postaci równania możemy to wyrazić, pisząc E = hv, gdzie *E* oznacza energię, v jest częstotliwością, a h stałą Plancka. To nie przypadek, że właśnie ten związek, zaproponowany przez Plancka w 1900 roku, był podstawą, na której Einstein pięć lat później oparł swoją hipotezę istnienia fotonów. Relacja ta bywa często nazywana wzorem Plancka–Einsteina. Fizycy potrzebowali dwudziestu lat, by w pełni zrozumieć znaczenie tej rewolucyjnej propozycji, silnie opartej na wynikach doświadczeń, i przedstawić spójną interpretację teoretyczną, taką jaką omawiamy w tej książce. Obecnie mamy zarówno równania Maxwella, *jak i* dyskretne jednostki światła.

Wspaniała opowieść o polach elektromagnetycznych i fotonach prowadzi nas prostą drogą do kolejnego ważnego odkrycia. Pozwala wyjaśnić, dlaczego i w jaki sposób Natura wytwarza olbrzymią liczbę części zamiennych.

Gdyby nasz opis podstawowych składników zakończył się na poziomie cząstek elementarnych, nie poznalibyśmy odpowiedzi na najważniejsze

pytanie. Wynika to stąd, że na tym poziomie musimy po prostu założyć, iż każdy rodzaj cząstki występuje w wielu jednakowych kopiach, że mamy wiele identycznych fotonów, mnóstwo jednakowych elektronów i tak dalej.

Wprowadzenie ustandaryzowanych części zamiennych było w historii przemysłu ogromnym postępem. Aby to było w ogóle możliwe, konieczne było wynalezienie nowych rodzajów maszyn i materiałów, tak by produkowane masowo części dokładnie pasowały do ustalonych wzorców. Jednak nawet gdy spełnimy takie wygórowane wymogi, wytworzone części ulegają zużyciu i po pewnym czasie przestają być jednakowe.

Zupełnie inaczej jest w przypadku fotonów, które zawsze mają takie same własności, bez względu na to, gdzie i kiedy się je wykrywa. Światło danego koloru jest zawsze takie samo – ma takie same właściwości i oddziałuje z materią w taki sam sposób – bez względu na jego źródło. Podobnie elektrony są takie same wszędzie, gdzie je wykrywamy. Gdyby na przykład elektrony w różnych atomach węgla nie były jednakowe, to każdy atom tego pierwiastka miałby inne właściwości i chemia przestałaby działać.

Jak Natura to robi? Aby zrozumieć zdumiewające podobieństwo wszystkich fotonów, wystarczy sobie uświadomić, że wszystkie mają takie samo źródło w postaci wspólnego, wszechobecnego pola elektromagnetycznego. Przez analogię powinniśmy więc wprowadzić pole – nazwijmy je polem elektronowym – którego wzbudzenia są elektronami. Wszystkie elektrony mają jednakowe własności, ponieważ każdy z nich jest stanem wzbudzenia tego samego, wszechobecnego pola.

Pola są niezbędne, jeśli chcemy spełnić zasadę lokalności, a pola kwantowe wytwarzają cząstki. Idąc dalej tym tokiem myślenia, możemy zrozumieć na głębszym poziomie, dlaczego istnieją cząstki i co sprawia, że cząstki tego samego rodzaju można zamieniać ze sobą bez najmniejszych kłopotów. Z tego wynika, że nie musimy jednak wprowadzać dwóch różnych rodzajów podstawowych składników: pól i cząstek. Pola są najważniejsze. To znaczy pola kwantowe.

Wracając do genezy pojęcia pola, czyli do prób wyobrażenia sobie strefy wpływu oddziaływań elektrycznych i magnetycznych w przestrzeni, możemy zauważyć, że pola kwantowe scalają nasz obraz świata w jeszcze inny sposób. Te same pola elektryczne i magnetyczne, które wytwarzają fotony, są także źródłem, zgodnie z wizją Faradaya – i wymową równań Maxwella – sił elektrycznych i magnetycznych.

Podsumujmy:

> Wychodząc od sił, dochodzimy do pól, a wychodząc od pól (kwantowych), dochodzimy do cząstek.
> Wychodząc od cząstek, dochodzimy do pól (kwantowych), a pola doprowadzają nas do sił.
> Możemy zatem wysnuć wniosek, że substancje i siły są dwoma przejawami jednej podstawowej rzeczywistości.

## CZTERY SIŁY

W tym podrozdziale przedstawimy w ogólnym zarysie nasze obecne rozumienie natury czterech znanych sił, wykorzystując do tego pojęcia wprowadzone w poprzednim rozdziale, a mianowicie zasady i własności, które przejawiają się istnieniem kilku rodzajów cząstek. Jak przed chwilą zauważyliśmy, na jeszcze głębszym poziomie cząstki zostają zastąpione polami.

Te cztery siły to:

• elektromagnetyzm, który w swojej pełnej kwantowej postaci przekształca się w elektrodynamikę kwantową (QED, od ang. *quantum electrodynamics*);
• oddziaływanie silne, które w swojej pełnej kwantowej postaci przekształca się w chromodynamikę kwantową (QCD, od ang. *quantum chromodynamics*);
• grawitacja, tak jak ją opisuje ogólna teoria względności Einsteina;
• oddziaływanie słabe.

Oddziaływania elektromagnetyczne i silne mają kluczowe znaczenie dla zrozumienia własności materii istniejącej na Ziemi. Siła elektromagnetyczna utrzymuje w całości atomy i określa ich strukturę. Opisuje również oddziaływania atomów ze światłem. Oddziaływanie silne natomiast utrzymuje w całości jądra atomowe i decyduje o ich strukturze.

Wpływ siły grawitacyjnej działającej między cząstkami elementarnymi jest znikomo mały. Gdy jednak w tym samym obszarze zbierze się bardzo

dużo cząstek, ich wpływ grawitacyjny się sumuje i ma dominujące znaczenie w oddziaływaniach między dużymi ciałami.

Oddziaływanie słabe decyduje o przebiegu procesów związanych z przemianą cząstek. Sprawia, że niektóre stabilne, zdawałoby się, cząstki ulegają rozpadowi, jak w przypadku pewnych odmian zjawiska promieniotwórczości. Warto również dodać, że oddziaływanie słabe bierze istotny udział w procesach prowadzących do uwolnienia energii, która zasila gwiazdy, w tym Słońce.

Zanim zagłębimy się w szczegóły, chciałbym wyjaśnić dwie rzeczy. Pierwsza dotyczy doboru słów. Fizycy często mówią o czterech „oddziaływaniach" zamiast o czterech siłach. Za takim wyborem terminologii stoi ważna argumentacja. Słowo „siła" ma ścisłą, matematyczną definicję w mechanice newtonowskiej, w której oznacza potencjalną przyczynę ruchu. Używając określenia „siła słaba", posłużylibyśmy się tym samym słowem w rozumieniu, które obejmuje oddziaływania prowadzące do powstania zupełnie innych efektów (chodzi o procesy zmieniające cząstkę jednego rodzaju w inną cząstkę). Z tego powodu będziemy używać określenia „oddziaływanie" jako terminu o bardziej ogólnym znaczeniu, choć w odniesieniu do „oddziaływania grawitacyjnego" czy „oddziaływania elektromagnetycznego" jest ono synonimem słowa „siła".

Druga kwestia ma związek z tym, co chciałem osiągnąć, pisząc tę książkę. Bezsprzecznie największą zaletą naszych teorii tych czterech oddziaływań jest fakt, że można je wyrazić zwięźle i dokładnie za pomocą kilku równań matematycznych. Z filozoficznego punktu widzenia z faktu tego wynika coś bardzo konkretnego i wcale nie musimy mieć wykształcenia matematycznego, by to zrozumieć. Oznacza to mianowicie, że możemy przetłumaczyć te teorie, bez utraty ich zawartości, na język programowania i zapisać je w postaci dość krótkich programów komputerowych. W następnym kroku moglibyśmy oczywiście połączyć nasze cztery programy opisujące oddzielne siły w jeden program nadrzędny. Tak skonstruowany program nadrzędny – system operacyjny świata fizycznego – byłby *o wiele* krótszy od systemów operacyjnych, które działają w dzisiejszych komputerach.

Jednak ceną, jaką musimy zapłacić za uzyskanie tak niezwykłej „kompresji danych", jest konieczność zapisywania informacji w postaci,

która w niczym nie przypomina żadnego języka naturalnego. W równaniach matematycznych lub ich odpowiednikach w programie komputerowym występują symbole i pojęcia, które są dość odległe od wszystkiego, z czym mamy do czynienia na co dzień i co stanowi podstawę języków naturalnych. Przejście od suchych równań do wynikających z nich wniosków, o których można już rozmawiać prostym językiem, wymaga wykonania żmudnych obliczeń i właściwej interpretacji wyników. Stanąłem więc przed koniecznością podjęcia decyzji – ściśle rzecz biorąc, był to cały ciąg decyzji – jak bardzo powinienem się zagłębiać w matematyczne szczegóły i jakie wynikające z nich konsekwencje należy podkreślić. Dokonane przeze mnie wybory nie zmieniają jednak ogólnego przesłania, które brzmi: działanie świata fizycznego można opisać za pomocą zaledwie kilku praw.

## ELEKTRODYNAMIKA KWANTOWA (QED)

### *Elektryczny atom*

Podstawowe zasady oddziaływań elektromagnetycznych, począwszy od prawa Coulomba, dotyczącego sił elektrycznych, a skończywszy na równaniach Maxwella, zostały ustalone w doświadczeniach z dużymi obiektami, które są widoczne gołym okiem. Niemniej jednak gdy uczeni zaczęli badać świat subatomowy, przyjęli przez domniemanie, że jedynymi znaczącymi siłami działającymi w fizyce atomowej są oddziaływania elektromagnetyczne i że w dalszym ciągu można się posługiwać równaniami Maxwella, by je opisać. Było to skrajnie zachowawcze założenie.

Taka śmiała strategia sprawdzała się jednak zaskakująco dobrze. Jeśli przyjmiemy podstawowy obraz zakładający, że większość masy atomu i cały jego dodatni ładunek elektryczny są zgromadzone w małym jądrze, a całą resztę stanowią elektrony, to równania Maxwella rozszerzone o warunek kwantowy – w odniesieniu do pola elektronowego – w zupełności wystarczają, by dopełnić całości. W ten sposób otrzymamy dokładny model atomu, z którego wynika wiele ciekawych wniosków.

Skąd wiemy, że jest poprawny? *Atomy nucą na falach światła pieśni, w których odkrywają swoją duszę*. Jeśli pozwolimy sobie na poetyckie porównanie, to takie zdanie trafnie opisuje sztukę i podstawy naukowe spektroskopii.

*Spektroskopia*

Zacznijmy od początku, a więc od pól fotonowych[22] i elektronowych. Z pola fotonowego, po przyjęciu odpowiedniego warunku kwantowego, otrzymujemy fotony. Ponieważ fotony są elektrycznie obojętne, nie dochodzi między nimi do żadnych bezpośrednich oddziaływań.

Z pola elektronowego, po przyjęciu odpowiedniego warunku kwantowego, otrzymujemy elektrony. Elektrony wpływają wzajemnie na siebie za pośrednictwem oddziaływań elektrycznych. Z tego powodu nie możemy skonstruować wszystkich stanów wzbudzonych pola elektronowego przez zwyczajne, niezależne dodanie do siebie stanów najbardziej podstawowych. Gdy jednak elektrony są od siebie oddalone na znaczną odległość, to energia ich oddziaływań jest dużo mniejsza od energii związanej w postaci ich masy (czyli od $E = mc^2$) i dzięki temu mogą zachować integralność. Innymi słowy, podstawowe stany wzbudzone pola elektronowego wyglądają jak grupka maleńkich cząstek – elektronów – które wzajemnie na siebie oddziałują. Taki obraz zaburzeń pola jest zazwyczaj przyjmowany za punkt wyjścia zarówno na zajęciach z podstaw fizyki, jak i w zaawansowanych podręcznikach z dziedziny chemii i biologii.

Aby zbudować model atomu, musimy jeszcze dodać do tego opisu jądro atomowe i pozwolić mu na to, by wpływało na stany wzbudzone pola elektronowego, które zawiera tyle elektronów, ile potrzeba, by zrównoważyć dodatni ładunek elektryczny jądra. Po wprowadzeniu takiej struktury dokładne równania pola elektronowego mogą się bardzo skomplikować, ponieważ musimy teraz uwzględnić zarówno wpływ jądra, jak i oddziaływania między poszczególnymi elektronami. Tak brzmi początek długiej i nigdy niekończącej się opowieści o fizyce atomowej i chemii, opisywanej na najbardziej podstawowym poziomie. Wielu utalentowanych naukowców poświęciło całą swoją karierę na badanie niewielkich wycinków tego szczegółowego obrazu.

My jednak postawiliśmy tu sobie szerszy i bardziej ograniczony cel. Chcemy zrozumieć na bardzo ogólnym poziomie, jak wyglądają niektóre z najprostszych przewidywań fizyki atomowej i w jaki sposób łączą się one z podstawowym opisem. Mając to na uwadze, możemy w cudownie piękny sposób wyrazić najważniejszy fakt związany z fizyką atomu, a mianowicie to, że *badając barwy światła wysyłanego przez atomy, zbierzemy bogate i szczegółowe informacje na temat ich struktury*.

Wyjaśnijmy, jak to działa. Atom może istnieć w stanach o różnej energii całkowitej. Z warunku kwantowego wynika, że dozwolone energie atomu muszą tworzyć pewien wzór dyskretnych wartości. Stan o wyższej energii może przejść do stanu, którego energia jest niższa, ale musi wtedy wyemitować foton. Energia tego fotonu odpowiada różnicy energii między początkowym i końcowym stanem atomu. Jak ustalili Planck i Einstein, energia fotonu jest ściśle związana z jego częstotliwością, czyli – co jest równoważne – z jego barwą. A kolor jest już czymś, co potrafimy zmierzyć.

Zestaw różnych barw światła wysyłanych przez dany atom nazywamy jego widmem. Jest to tak ważne zjawisko, że w fizyce wykształcił się odrębny dział zajmujący się badaniem widm, który nazywamy spektroskopią. Uczeni działający w tej dziedzinie mają do dyspozycji potężne narzędzia służące nam do komunikacji z Naturą. Można je wykorzystywać do badania nie tylko elektrycznie obojętnych atomów, lecz także cząsteczek, atomów, które nie są elektrycznie obojętne (czyli jonów), i wszystkiego, co wytwarza światło.

W 1913 roku, zanim mechanika kwantowa przekształciła się do współczesnej, dojrzałej postaci, Niels Bohr wymyślił pewne reguły, które pozwalają ograniczyć dopuszczalne wartości energii atomu wodoru. Formułując te zasady, nie opierał się na niczym poza własną intuicją. Postulaty Bohra przewidują powstanie widma, które bardzo dobrze zgadza się z ówczesnymi wynikami doświadczeń. Nie jest to do końca zaskakujące, ponieważ gdy nad nimi pracował, miał na celu wyjaśnienie właśnie tych obserwacji. Większe wrażenie robi fakt, że z modelu Bohra można było wysnuć dodatkowe przewidywania, które również okazały się poprawne. Gdy podczas jednego z seminariów Einstein dowiedział się, że udało się potwierdzić jedno z takich ważnych przewidywań, był wyraźnie poruszony i powiedział (odnosząc się do pracy Bohra): „W takim razie jest to jedno z największych odkryć”.

Śmiały model Bohra odniósł sukces i wywarł ogromny wpływ na naukę. Zachęcił innych fizyków do poszukiwania bardziej ogólnych, spójnych logicznie warunków kwantowych. Obecnie uważa się, że postulaty Bohra wraz ze wzorem Plancka–Einsteina stanowiły pierwszy krok na drodze do sformułowania współczesnych warunków kwantowych.

Einstein nazwał dokonania Bohra „najwyższą postacią muzykalności w sferze myśli”. Jednak współczesna mechanika kwantowa, która wywodzi się z tych prac, jest jeszcze bardziej harmonijna, a podobieństwo jej równań do równań opisujących dźwięki jest wprost uderzające.

Równania pola elektronowego wokół jądra przypominają na przykład te opisujące brzmienie gongu zbudowanego z niezwykłego materiału. W ramach takiego porównania widmo barw światła wysyłanego przez atom odpowiada widmu dźwięków wydawanych przez gong. Oba zestawy równań odzwierciedlają stabilne wzory drgań odpowiadających im „instrumentów”. Jednak widma atomów nie nadają się do komponowania muzyki. Nie można ich przełożyć na dźwięki należące do którejś ze znanych skal muzycznych. Szczególnie jest to widoczne w przypadku, gdy uwzględnimy więcej niż jeden elektron, ponieważ dopuszczalne wzory drgań stają się wówczas bardzo złożone. Widma atomów są ściśle określone i w zasadzie zawsze można je wyliczyć, ale potrafią być naprawdę skomplikowane.

Zdyscyplinowana złożoność widm jest prawdziwym darem, który pozwala nam poszerzać wiedzę. Ponieważ każdy rodzaj atomu tworzy charakterystyczny wzór światła, widma atomów są ich swoistym podpisem lub odciskiem palca. Wystarczy tylko spojrzeć – zwracając szczególną uwagę na barwy! – by ustalić tożsamość i zbadać zachowanie atomów, które mogą być bardzo od nas oddalone zarówno w przestrzeni, jak i czasie. Dzięki temu cały kosmos staje się gigantycznym, świetnie wyposażonym laboratorium chemicznym. Z tego powodu spektroskopia jest jednym z podstawowych filarów astrofizyki i kosmologii.

Spektroskopia pozwala nam również weryfikować teorie opisujące podstawy fizyki. Ponieważ na razie dokładne teoretyczne obliczenia widm atomów – w przypadkach, w których udało nam się je wykonać – zgadzają się z wynikami precyzyjnych obserwacji, mamy coraz większą pewność, że sformułowane przez nas prawa są poprawne. A skoro astronomowie i chemicy wszędzie dostrzegają ten sam zestaw widm atomów, nawet gdy

obserwują światło docierające z zamierzchłej przeszłości, dochodzimy do wniosku, że podstawowe substancje podlegają tym samym prawom w całym Wszechświecie i na przestrzeni całej jego historii.

## CHROMODYNAMIKA KWANTOWA (QCD)

Udane modele atomów i wspaniałe osiągnięcia spektroskopii bazują na śmiałym założeniu, że atomy mają w środku niewielkie jądro, w którym mieści się cały ich dodatni ładunek elektryczny i niemal cała masa. Po tym niewątpliwym sukcesie kolejnym punktem na liście zadań stojących przed fizykami było, co jest dość logiczne, wyjaśnienie budowy tych jąder. Aby to osiągnąć, uczeni rozpoczęli badania, które odgrywały dominującą rolę w fizyce przez większą część XX stulecia i okazały się pełne zaskakujących odkryć i zwrotów akcji. Ponieważ jednak chcemy jak najszybciej przejść do kwestii podstawowych, niemal przez całą tę historię przemkniemy dość szybkim krokiem. Wszystkich zainteresowanych, którzy chcieliby się dowiedzieć czegoś więcej na temat wczesnej historii fizyki jądrowej i jej niespodziewanych, ważnych odgałęzień, odsyłam do wspaniałej książki *Jak powstała bomba atomowa* Richarda Rhodesa.

Przed powstaniem chromodynamiki kwantowej najważniejszym osiągnięciem fizyki jądrowej było odkrycie, że jądra atomowe można opisywać za pomocą modeli złożonych z protonów i neutronów. Nie ulegało jednak wątpliwości, że między tymi cząstkami musi działać jakaś nowa siła utrzymująca jądro w całości, ponieważ siła elektryczna oddziałująca między protonami odpycha je od siebie, a grawitacja jest o wiele za słaba, by temu zapobiec. Uczeni nazwali tę nową siłę oddziaływaniem silnym i postanowili wyjaśnić, jak ona działa. Gdy jednak pełni nadziei zabrali się do badania zachowania protonów i neutronów, sprawy zaczęły się bardzo szybko komplikować. Rzeczywistych postępów udało się im dokonać dopiero wtedy, gdy zajrzeli *do środka* protonów.

*W środku protonów*

Aby zajrzeć do wnętrza protonów, fizycy zastosowali podobną strategię jak podczas wcześniejszych badań wnętrza atomu – wykonywali doświadczenia z rozpraszaniem na wzór omawianego wcześniej eksperymentu Geigera i Marsdena, ale z wykorzystaniem innego rodzaju wiązek i z kilkoma ulepszeniami. Ustawiali przedmiot swoich badań na drodze strumienia cząstek, patrzyli, w jaki sposób cząstki wiązki odbijają się od celu, i starali się ustalić, jaka struktura mogła spowodować powstanie zaobserwowanego wzoru.

Kluczowa różnica polegała na tym, że tym razem należy badać nie tylko to, jak bardzo cząstki wiązki się odchylają (w pierwszych doświadczeniach były to elektrony), lecz także to, ile tracą energii. Dzięki tej dodatkowej informacji można bowiem określić rozkład zarówno w przestrzeni, jak i w czasie. W ten sposób, po przeprowadzeniu skomplikowanej obróbki wyników, fizycy otrzymywali *zdjęcia* wnętrza protonu. Okazuje się, że wykonywanie „zdjęć”, czyli uzyskiwanie obrazu badanej struktury w jednej określonej chwili, jest bardzo ważne, ponieważ sytuacja we wnętrzu protonu jest bardzo dynamiczna. Przy długim czasie ekspozycji – co w tym kontekście oznacza czas dłuższy niż jedna kwadrylionowa sekundy – obraz robi się zamazany.

*Wolność i uwięzienie*

Na obrazach wnętrza protonu udało się dostrzec kilka zaskakujących rzeczy. Przede wszystkim dowiedzieliśmy się, że w protonach znajdują się mniejsze cząstki, między innymi kwarki. Uczeni wprowadzili kwarki już wcześniej, używając ich jako narzędzia teoretycznego, które pomaga w uporządkowaniu wyników obserwacji procesów związanych z oddziaływaniem silnym, ale w większości nie do końca wierzyli w ich fizyczne istnienie. Nawet jeden z fizyków, którzy je wymyślili, Murray Gell-Mann, wyrażał wątpliwości. Porównywał kwarki do cielęciny w pewnym francuskim przepisie, w którym „kawałek mięsa bażanciego należy upiec między dwoma plastrami cielęciny, a na koniec wyrzucić oba plastry”.

(Drugi uczony, którego uważa się za ojca koncepcji kwarków, George Zweig, traktował je dużo bardziej dosłownie. Przez wiele lat próbował wymyślić sposób pozwalający wykryć pojedyncze kwarki poza protonem. Te próby nigdy się nie powiodły, ponieważ, jak obecnie wiemy – albo jak nam się wydaje, że wiemy – takie wysiłki są z góry skazane na porażkę).

Sceptycyzm odnośnie do istnienia kwarków był do pewnego stopnia uzasadniony, ponieważ cząstki te przejawiają kilka niezwykłych właściwości i zachowują się w zaskakujący sposób. Po pierwsze, mają ładunek elektryczny, którego wartość jest ułamkiem ładunku elektronu. Żadna z odkrytych wcześniej cząstek nie miała ułamkowego ładunku. Po drugie, kwarki nigdy nie występują oddzielnie – zawsze znajdują się we wnętrzu protonów i innych silnie oddziałujących cząstek (tak zwanych hadronów).

Ten drugi fakt, zwany „uwięzieniem kwarków”, ciągle pozostaje zagadkowy, mimo iż udało nam się wykonać zdjęcia protonów świadczące niezbicie o istnieniu kwarków. Wydaje się, że we wnętrzu protonu kwarki praktycznie w ogóle na siebie nie wpływają. Muszą jednak działać między nimi jakieś siły, które nie pozwalają im się wydostać na zewnątrz.

Celem moich pierwszych dojrzałych badań naukowych, które przeprowadziłem na studiach doktoranckich pod kierunkiem Davida Grossa, było rozwiązanie właśnie tego problemu. Chcieliśmy znaleźć jakąś teorię, która pozwoliłaby wyjaśnić paradoksalne zachowanie kwarków, spełniając jednocześnie „święte zasady” lokalności, względności i teorii kwantowej.

Szukaliśmy więc teorii *bazującej na polach kwantowych*, która prowadziłaby do powstania dość specyficznych oddziaływań między cząstkami. Chodziło nam o to, by między cząstkami pojawiła się bardzo duża siła przyciągająca, gdy są one daleko od siebie, ale w miarę zmniejszania się odległości przyciąganie powinno wyraźnie słabnąć. W naszym makroskopowym świecie możemy wytwarzać tego typu siły za pomocą gumek. Jednak gumki nie są polami kwantowymi. Okazało się, że zmuszenie pól kwantowych, by zachowywały się jak gumki, wcale nie jest takie łatwe.

Po krótkich, ale intensywnych poszukiwaniach znaleźliśmy w końcu teorię, która spełniała te warunki. Obecnie jest ona znana jako chromodynamika kwantowa. Na początku istniało niewiele faktów

przemawiających za poprawnością naszej teorii. Jednak z biegiem czasu uczeni zaczęli wykonywać doświadczenia w akceleratorach o coraz większej energii, a dzięki rozwojowi techniki komputerowej można było rozwiązywać coraz trudniejsze problemy teoretyczne i w końcu zaczęło się pojawiać coraz więcej dowodów potwierdzających naszą teorię. Obecnie, niemal pięćdziesiąt lat później, ich liczba jest naprawdę ogromna.

Uważam, że spotkało mnie ogromne szczęście, iż mogłem przejść wszystkie etapy tej drogi, od mglistych pomysłów i chwil konsternacji przez rygorystyczne badania, przebłyski olśnienia, obliczenia, sprawdzalne przewidywania, by w końcu, u kresu podróży, poznać prawdę o fizycznej rzeczywistości. W 2004 roku razem z Davidem Grossem otrzymaliśmy Nagrodę Nobla za naszą pracę. Podzieliliśmy się nią z Davidem Politzerem, który niezależnie od nas wykonał podobne obliczenia.

*Masa z energii:* $m = E/c^2$

Omówmy teraz jedno z najważniejszych zastosowań wynikających z elektrodynamiki kwantowej. Otóż, jak się okazuje, QCD pozwala nam wyjaśnić pochodzenie większości naszej masy.

Słynny wzór Einsteina $E = mc^2$ opisuje energię drzemiącą w każdym ciele znajdującym się w stanie spoczynku, która wynika z jego masy. Ponieważ obowiązuje zasada zachowania energii, możemy wykorzystać ten wzór do obliczenia, ile energii ulega uwolnieniu, gdy jakaś cząstka rozpada się na inne cząstki o mniejszej masie. Właśnie tak wykorzystuje się wzór Einsteina, gdy badamy, w jaki sposób energia powstająca w procesach promieniotwórczych zachodzących we wnętrzu Ziemi powoduje przemieszczanie się płyt kontynentalnych (jest to tak zwana teoria tektoniki płyt) lub jak przebiega proces spalania paliwa jądrowego w gwiazdach.

Jest coś pięknego w tym, że logikę tego wzoru można również odczytywać w przeciwnym kierunku i wówczas mamy do czynienia ze zjawiskiem tworzenia się masy z czystej energii: $m = E/c^2$. Tak powstaje większa część masy protonów i neutronów – a zatem także większa część masy każdego człowieka i wszystkich otaczających nas przedmiotów.

We wnętrzu protonów mamy kwarki i gluony[23]. Kwarki mają bardzo małą masę, a masa gluonów jest zerowa. Cząstki te poruszają się jednak we wnętrzu protonu z bardzo dużą szybkością i w związku z tym mają

znaczną energię. Cała ta energia się sumuje. Gdy taka sumaryczna energia zostaje zamknięta w obiekcie, który jako całość znajduje się w spoczynku – tak jak w przypadku protonu – to jego masa zwiększa się o wartość $m = E/c^2$. W ten sposób można wyjaśnić niemal całą masę protonów i neutronów – okazuje się, że niemal w całości jest ona wytworem czystej energii. Z kolei prawie cała masa każdego człowieka jest sumą masy protonów i neutronów tworzących jego ciało. Mistycy, szczególnie ci wywodzący się z chińskiego kręgu kulturowego, mówią często o *qi*, energii Wszechświata, która przepływa przez każdą istotę, i zalecają ćwiczenia poprawiające równowagę wewnętrznej energii *qi*. Z elektrodynamiki kwantowej możemy się dowiedzieć, że każdy z nas osiąga taki stan w sposób całkowicie naturalny.

W moich najwcześniejszych wspomnieniach z dzieciństwa przewija się niewielki notes, który zawsze nosiłem przy sobie, gdy po raz pierwszy próbowałem się nauczyć teorii względności i algebry. Tak naprawdę nie rozumiałem ani jednego, ani drugiego, ale byłem przekonany, że jeśli się solidnie do tego przyłożę, to może w końcu odkryję coś równie wspaniałego jak wzór $E = mc^2$. Na jednej z kartek zapisałem: $m = E/c^2$. Gdybym tylko wtedy wiedział…

## GRAWITACJA (OGÓLNA TEORIA WZGLĘDNOŚCI)

### *Newtonowski zbieg okoliczności*

Newtonowskie prawo powszechnego ciążenia, wykorzystujące wspomniany już wcześniej prosty wzór opisujący siłę grawitacji, odnosiło sukces za sukcesem przez ponad dwieście lat. Jednak od samego początku tkwił w nim zagadkowy, niewyjaśniony zbieg okoliczności – a tak naprawdę nieskończona liczba zbiegów okoliczności. Z zasad dynamiki Newtona wynika, że siła działająca na ciało jest równa jego masie pomnożonej przez przyspieszenie, jakie mu nadaje. Z kolei newtonowskie prawo powszechnego ciążenia głosi, że siła grawitacyjna działająca na ciało *również* jest proporcjonalna do jego masy. Jeśli połączymy ze sobą oba wzory, masa ciała się uprości. To oznacza, że grawitacja jest powszechnym

źródłem przyspieszenia i jest ono takie samo wobec wszystkich ciał, na które działa.

W teorii Newtona występują dwa różne rodzaje masy. W jednym kontekście mamy masę bezwładną, która decyduje o reakcji ciała na działanie ogólnie rozumianych sił. W drugim pojawia się masa grawitacyjna, która określa, jak dane ciało odczuwa wpływ siły grawitacyjnej lub samo ją wytwarza[24]. W strukturze logicznej teorii nie ma niczego, co sugerowałoby, że masa bezwładna musi być proporcjonalna do masy grawitacyjnej. Teoria Newtona wciąż działałaby doskonale, gdyby tak nie było. Można sobie na przykład wyobrazić, że stosunek masy bezwładnej do grawitacyjnej mógłby zależeć od składu chemicznego danego ciała. Niezawodnie występująca proporcjonalność masy bezwładnej do grawitacyjnej – czyli mówiąc inaczej, powszechność przyspieszenia grawitacyjnego – pozostaje w teorii Newtona niewyjaśnionym zbiegiem okoliczności.

*Aktywna czasoprzestrzeń*

Einstein przedstawił swoją teorię grawitacji, ogólną teorię względności, w 1915 roku. Teoria ta wyjaśnia zbieg okoliczności występujący w prawach Newtona w zdumiewający i bardzo satysfakcjonujący sposób. Jest również spełnieniem marzenia Newtona o teorii grawitacji opartej na zasadzie lokalności działań, ponieważ posługuje się takim samym formalizmem bazującym na polach jak teoria elektromagnetyzmu.

Jeśli nie zależy nam na szczegółach matematycznych – a dla nas, oczywiście, nie są one tak bardzo istotne – to możemy przedstawić imponującą logikę ogólnej teorii względności w dziesięciu ogólnych uwagach:

1. Powszechnie obowiązująca prawda powinna mieć ogólne wyjaśnienie.
2. W takim razie „zbieg okoliczności” polegający na tym, że grawitacja nadaje takie samo przyspieszenie każdemu ciału, które zajmuje określone miejsce w określonym czasie, bez względu na jego własności, powinien mieć charakter jakiejś cechy podstawowej.
3. Z powyższego wynika, że przyspieszenie grawitacyjne powinno być odzwierciedleniem pewnej własności czasoprzestrzeni.

4. Jedną z własności czasoprzestrzeni jest jej krzywizna[25].
5. Krzywizna czasoprzestrzeni wpływa na ruch przemieszczających się w niej ciał. Może się zdarzyć, że ciała starające się poruszać „możliwie najbardziej prosto” nie będą się wcale przemieszczały po linii prostej.
6. W czasoprzestrzeni linia prosta odpowiada ruchowi ze stałą prędkością. W takiej sytuacji odchylenia od ruchu po linii prostej oznaczają przyspieszenie.
7. Jeśli powiążemy ze sobą informacje z punktów 5 i 6, zauważymy, że istnieje pewien sposób na spełnienie postulatu z punktu 3 – wystarczy przyjąć, że grawitacja jest odzwierciedleniem krzywizny czasoprzestrzeni.
8. Krzywizna może być różna w różnych miejscach, a także w różnych chwilach, a to oznacza, że definiuje pewne pole.
9. Jeśli chcemy uzyskać teorię grawitacji, musimy zapisać równanie łączące krzywiznę pola czasoprzestrzeni z wpływem materii. Jest to konieczne, już od czasów Newtona bowiem wiadomo, że materia wytwarza grawitację.
10. Z prawa powszechnego ciążenia wynika, że kluczową własnością materii, która decyduje o sile wpływu grawitacyjnego, jest jej masa. A zatem krzywizna czasoprzestrzeni, która jest odzwierciedleniem grawitacji, musi być proporcjonalna do masy. Ten wniosek jest w zasadzie naszym rozwiązaniem. Trzeba go jeszcze uściślić, by móc zapisać dokładne równanie, ale gdy ma się już szczególną teorię względności, to wprowadzenie wszystkich potrzebnych usprawnień jest już tylko kwestią zastosowania odpowiedniej techniki. (Jak wspomnieliśmy wcześniej, główna zmiana polega na uświadomieniu sobie, że wszystkie rodzaje energii, a nie tylko energia masy, wywierają wpływ grawitacyjny).

John Wheeler, piewca teorii względności, podsumował to następującymi słowami: „Czasoprzestrzeń mówi materii, jak ma się poruszać, a materia instruuje czasoprzestrzeń, jak powinna się zakrzywiać”.

# ODDZIAŁYWANIE SŁABE

## *Alchemia naturalna*

Oddziaływanie słabe ani niczego ze sobą nie wiąże, ani nie wprawia w ruch. Jego znaczenie polega na zdolności do przekształcania materii. Właśnie ta cecha, *w połączeniu ze słabością tego oddziaływania*, decyduje o tym, że odgrywa ono osobliwą, kluczową rolę w ewolucji Wszechświata. Dzięki temu oddziaływaniu może funkcjonować swoisty kosmiczny akumulator, który powoli uwalnia kosmiczną energię.

Jeśli ktoś chce się dowiedzieć czegoś na temat oddziaływania słabego, to powinien zacząć od procesu rozpadu neutronu. Jest to jeden z najprostszych przejawów tego oddziaływania, a przy tym także jeden z najważniejszych. Czas połowicznego rozpadu swobodnego neutronu wynosi nieco ponad dziesięć minut i niemal zawsze w wyniku tego procesu powstają: proton, elektron i antyneutrino. (Antyneutrina są antycząstkami neutrin). Ponieważ neutrony i protony są dużo cięższe od innych cząstek, spróbujmy spojrzeć na to zjawisko z nieco innej perspektywy. Możemy mianowicie powiedzieć, że jest to proces, w którym dochodzi do przekształcenia neutronów w protony i uwolnienia pewnej energii.

Pierwszą rzeczą, na jaką należy zwrócić uwagę, jest to, że w świecie subatomowym dziesięć minut to cała wieczność.

Dla porównania czas życia hadronów, które rozpadają się za sprawą oddziaływania silnego (w wyniku przetasowania kwarków i gluonów), wynosi zaledwie niewielki ułamek sekundy. Oddziaływanie silne działa około $10^{27}$, czyli 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 razy szybciej. W tym kontekście niestabilność wynikająca z wpływu oddziaływania słabego, które powoduje rozpad neutronu, potrzebuje bardzo dużo czasu, by się umocnić i dojść do głosu. Innymi słowy, jest to bardzo słaba niestabilność. Właśnie dlatego jej przyczynę nazywamy oddziaływaniem *słabym*.

Podstawowym procesem fizyki cząstek, z którym mamy do czynienia podczas rozpadu neutronu, jest przekształcenie kwarka *d* w *u* (oraz wytworzenie elektronu i antyneutrina). Ponieważ neutrony są kombinacją kwarków *udd*, natomiast protony składają się z kwarków *uud*, taka przemiana wystarcza, by zmienić neutron w proton.

Choć oddziaływanie przekształcające neutrony w protony jest naprawdę słabe, może robić rzeczy, których inne siły nie potrafią. Ani oddziaływanie silne, ani elektromagnetyczne czy grawitacyjne nie mogą zmienić jednego rodzaju kwarka w inny. Oddziaływanie słabe ma natomiast zdolność przekształcania cięższych kwarków w lżejsze. Wszystkie „dodatkowe cząstki", o których wspomnieliśmy w poprzednim rozdziale[26], są bardzo niestabilne, co wynika z wpływu oddziaływania słabego.

Oddziaływanie słabe działa na kwarki niezależnie od tego, gdzie się znajdują. To oznacza, że może przekształcać neutrony w protony nie tylko wtedy, gdy cząstki te są swobodne, ale również wtedy, gdy są związane w jądrach atomowych. Gdy do tego dochodzi, w nowym jądrze pojawia się jeden dodatkowy proton i ubywa jeden neutron, jeśli porównamy to ze stanem sprzed przemiany. (Elektron i antyneutrino uciekają na zewnątrz). Ponieważ liczba protonów w jądrze atomowym określa własności elektryczne atomu, a więc także jego właściwości chemiczne, nasz proces powoduje przemianę jednego rodzaju pierwiastka w zupełnie inny pierwiastek. Właśnie o czymś takim marzyli dawni alchemicy, a później twórcy nowoczesnej chemii doszli do wniosku, że jest to niemożliwe. Teraz okazało się, że oddziaływanie słabe dokonuje przemiany alchemicznej w sposób całkowicie naturalny.

## PRZYSZŁOŚĆ WIEDZY

*Czy to już wszystko, co istnieje?*

Paul Dirac, wielki fizyk matematyczny, który zmienił elektrodynamikę kwantową w przewidywalną naukę, już w 1929 roku stwierdził: „W ten sposób całkowicie poznaliśmy podstawowe prawa fizyczne potrzebne do skonstruowania teorii matematycznej opisującej dużą część fizyki i całą chemię".

Miał tu na myśli prawa elektrodynamiki kwantowej i ich zastosowanie do opisu materii składającej się z elektronów, fotonów i jąder atomowych. Po upływie dziewięćdziesięciu lat i wykonaniu tysięcy doświadczeń, podczas których znaleziono wiele nowych zastosowań i odkryto mnóstwo faktów

z dziedziny fizyki atomowej i chemii, to śmiałe stwierdzenie nie tylko nie straciło nic na swojej aktualności, ale wręcz zyskało na prawdziwości, ponieważ nasza teoria stała się w tym czasie jeszcze bardziej rygorystyczna. Gdy udało nam się zrozumieć oddziaływania silne i słabe, nasze rozumienie świata na podstawowym poziomie znacznie się poszerzyło – owa „duża część fizyki" stała się jeszcze większa. W 1929 roku fizycy nie potrafili na przykład wyjaśnić do końca, skąd gwiazdy czerpią swoją energię ani jakie siły utrzymują w całości jądra atomowe. Dzisiaj nie mamy już wątpliwości, jak przebiegają te procesy, ponieważ udało nam się sprawdzić nasze teorie w tysiącach starannie przeprowadzonych doświadczeń.

Gdy Dirac pisał dalej: „a główna trudność polega na tym, że próbując zastosować te prawa w praktyce, uzyskujemy równania, które są zbyt złożone, by można je było rozwiązać", nikomu nawet się jeszcze nie śniły współczesne superkomputery. Z ich pomocą coraz lepiej radzimy sobie z rozwiązywaniem równań, które pojawiają się, gdy staramy się wyjaśnić świat na poziomie podstawowym. Równania elektrodynamiki i chromodynamiki kwantowej, ogólnej teorii względności, a także równania opisujące oddziaływanie słabe – po sformułowaniu ich w kontekście teorii kwantowej – umożliwiły wynalezienie wielu przydatnych urządzeń, takich jak lasery, tranzystory, reaktory jądrowe, skanery do badań metodą rezonansu magnetycznego i odbiorniki systemu GPS.

Chemicy i materiałoznawcy nie muszą się jednak martwić o to, że wkrótce staną się niepotrzebni. Gdy próbujemy analizować bardziej skomplikowane układy, wykraczające poza kilka prostych przykładów związanych z małymi cząsteczkami lub doskonałymi kryształami, nie możemy już przewidzieć ich zachowania za pomocą samych tylko obliczeń – takie podejście okazuje się całkowicie niepraktyczne. Chemicy i inżynierowie bardzo rzadko, jeśli w ogóle, zajmują się kwarkami i gluonami. Aby dokonać postępu, musimy wymyślać nowe metody przybliżeń, wprowadzać uogólnienia, budować szybsze i potężniejsze komputery oraz wykonywać doświadczenia.

Jednak zupełnie inną kwestią jest pytanie o to, czy trudność polega *wyłącznie* na fakcie, że nasze fundamentalne równania są trudne do rozwiązania. Czy to możliwe, że w naszym opisie w ogóle brakuje jakichś ważnych zjawisk? Czy faktycznie to już wszystko, co istnieje?

Prawa opisujące te cztery oddziaływania, po uwzględnieniu ich wszystkich razem, tworzą strukturę, którą czasami nazywa się „Modelem Standardowym” lub (jak ja wolę ją nazywać) „Rdzeniem”. Współdziałają razem niczym dobrze naoliwiona maszyna. Mamy uzasadnione podstawy, by sądzić, że Rdzeń – czyli podstawowe prawa opisujące elektrodynamikę i chromodynamikę kwantową, grawitację oraz oddziaływanie słabe – stanowi właściwy fundament dla praktycznych zastosowań fizyki i że będzie pełnił taką podstawową funkcję w dającej się przewidzieć przyszłości.

Jeden z powodów, które za tym przemawiają, jest dość oczywisty. Prawa te udało się już sprawdzić z dużo większą dokładnością i w dużo większym zakresie, niż jest to konieczne dla praktycznych zastosowań w chemii, biologii, inżynierii, a nawet astrofizyce (z wyjątkiem kosmologii wczesnego Wszechświata).

Drugi powód ma charakter bardziej teoretyczny. Pola kwantowe stanowią wspaniałe narzędzie, ale są bardzo niewdzięczne w praktycznych zastosowaniach. Posługiwanie się nimi w sposób spójny z punktu widzenia matematyki jest diabelnie trudne. Przy odrobinie nieuwagi można łatwo uzyskać układy równań, które nie mają rozwiązań. To sprawia, że Rdzeń, który jest silnie zakorzeniony w polach kwantowych, charakteryzuje się pewną sztywnością. Trudno jest zmienić w nim cokolwiek, tak by cała konstrukcja nadal poprawnie działała.

Możemy *dodawać* różne rzeczy do Rdzenia, ale musi to być albo jakaś nowa postać materii, która bardzo słabo oddziałuje ze znaną nam materią, albo element zmieniający zachowanie cząstek elementarnych w „niepraktycznych” – czyli bardzo wysokich – energiach. Aksjony, które omówimy w dalszej części książki, są przykładem pierwszego z tych dwóch rodzajów. Teoria superstrun, głosząca, że cząstki elementarne są w istocie strunami, to przykład rozszerzenia drugiego typu[27]. Tego rodzaju dodatki mogą usuwać niektóre kosmologiczne lub estetyczne wady naszych równań podstawowych, ale jest raczej mało prawdopodobne, by miały jakieś znaczenie dla zastosowań praktycznych.

Parafrazując Diraca, możemy powiedzieć, że to jest wszystko, co istnieje, *z praktycznego punktu widzenia*.

Na szczęście życie to coś więcej niż tylko ustalanie podstaw – lub szukanie praktycznych zastosowań.

*Unifikacja sił*

Rdzeń zawiera zalążki struktur, które mogą się okazać większe od niego.

Trzy z czterech uwzględnionych w nim sił – a więc siły elektrodynamiki i chromodynamiki kwantowej oraz oddziaływanie słabe – wymagają istnienia różnych rodzajów ładunku[28]. Istnieją też pola, które reagują na obecność tych ładunków i pola zmieniające rodzaj ładunku. (Pola gluonowe zmieniają na przykład jeden rodzaj ładunku kolorowego w inny). Mamy więc ładunek elektryczny, trzy rodzaje ładunku kolorowego i dwa ładunki oddziaływania słabego. Czyż może być coś bardziej naturalnego od wyobrażenia sobie jakiegoś szerszego formalizmu, który jednakowo traktowałby wszystkie te ładunki i pozwalał je wzajemnie w siebie przekształcać?

Z tą atrakcyjną ideą wiąże się jednak pewien duży problem. Z jednej strony nie mamy najmniejszych nawet dowodów na to, by takie eleganckie przekształcenia były dopuszczalne. Wręcz przeciwnie, jeśli w ogóle jest to możliwe, to takie zdarzenia muszą zachodzić bardzo rzadko. Gdyby istniała możliwość zmiany ładunku kolorowego w inne ładunki, to kwarki mogłyby się zmieniać w elektrony, a protony byłyby niestabilne. Jednak uczeni przeprowadzili wiele doświadczeń mających na celu wykrycie rozpadu protonu i niczego takiego nie udało im się zaobserwować.

Z drugiej strony przy okazji formułowania teorii oddziaływań słabych poznaliśmy metodę pozwalającą uratować piękne równania, które wydają się „zbyt dobre dla tego świata”. Możemy sobie wyobrazić bardziej pusty świat, w którym obowiązują piękne równania, a potem wypełnić go odpowiednią substancją (kondensatem Higgsa)[29], by zaczął przypominać nasz świat rzeczywisty.

Czy da się zastosować taką strategię również w tym przypadku? Czy różnice między ładunkami mogą wynikać ze skomplikowanego wpływu jakiegoś innego kosmicznego ośrodka złożonego z cięższych i jeszcze bardziej nieuchwytnych cząstek przypominających bozony Higgsa?

Istnieje piękny powód, by tak uważać. Wynika on z innego kluczowego pojęcia związanego z Rdzeniem, a mianowicie ze swobody asymptotycznej. Mówiąc ogólnie, swoboda asymptotyczna jest odpowiedzialna za osłabienie oddziaływania silnego na małych odległościach. Mówiliśmy o tym już wcześniej, ale bez nazywania tego zjawiska. Swoboda asymptotyczna

odegrała kluczową rolę w sformułowaniu chromodynamiki kwantowej i to właśnie dzięki niej potrafimy wiele rzeczy przewidzieć na gruncie teorii. Stosując taką samą metodę, możemy również obliczać, jak inne siły zmieniają się z odległością. Dzięki obliczeniom tego typu udało nam się dojść do wspaniałego wniosku. Odkryliśmy mianowicie, że na niezwykle małych odległościach dochodzi do unifikacji. Siła wszystkich czterech oddziaływań staje się wówczas taka sama. Właśnie coś takiego powinno się dziać w zunifikowanej teorii pola. Analizując małe odległości, minimalizujemy wpływ złożonego ośrodka. W wynikach takich obliczeń możemy dostrzec idealny świat, który sobie wyobraziliśmy[30]. W ten sposób niesprecyzowane marzenia Einsteina o stworzeniu zunifikowanej teorii pola nabrały konkretnych kształtów i możemy nawet opisać taką koncepcję ilościowo.

Wizja będąca motorem naszego dążenia do unifikacji jest naturalnym, logicznym rozszerzeniem najważniejszych idei Rdzenia, a mianowicie faktu, że mamy równania bazujące na ładunkach i ich przekształceniach, symetrię zasłoniętą przez ośrodek wypełniający cały świat i swobodę asymptotyczną. Razem idee te pozwalają wyjaśnić „zbieg okoliczności" związany z siłą wszystkich oddziaływań (włącznie z grawitacją). Jeśli uda nam się kiedykolwiek zaobserwować rozpad protonu, zdobędziemy dowód na poprawność tej wizji. Poszukiwania trwają.

### *Całościowa wizja wszystkiego*

> Świat obiektywny po prostu *istnieje*, a nie *dzieje się*. To jedynie spojrzenie mojej świadomości, kroczące wzdłuż linii życia mojego ciała, sprawia, że wycinek tego świata ożywa jako ulotny obraz przestrzeni nieustannie zmieniający się w czasie.
>
> Hermann Weyl

Idea, że „podstawowe prawa opisują zmianę", była dla nas w poprzednim rozdziale jedną z zasad, które pozwoliły nam wyjaśnić w sposób naukowy, jak działa świat. Dobrze się nam przysłużyła. Podstawowe prawa Rdzenia mają taki właśnie charakter. Opisują, co się *dzieje*.

Jednak granica między tym, co *jest*, a tym, co się *dzieje*, nie zawsze jest wyraźna i nieprzekraczalna. Odwieczne prawa opisujące zmiany same się nie zmieniają. Nie pojawiają się w pewnym określonym momencie, ale po

prostu są. Opisując wynikające z nich konsekwencje, możemy wiele powiedzieć na temat trwałych cech świata – czyli, innymi słowy, na temat tego, czym świat *jest* – mimo iż, na pozór, prawa te mówią tylko o tym, co się *dzieje*.

Gdy się na przykład zastanawiamy, co się *dzieje*, gdy badamy materię w bardzo małej skali i odkrywamy, że w istocie *jest* ona zbudowana z kilku tylko składników, które możemy opisać za pomocą nielicznych własności, to przekraczamy tę granicę. Jeśli przeanalizujemy, co się *dzieje*, gdy zgromadzimy te składniki w jednym miejscu i pozwolimy im przyjąć wybrany przez nie stan, to odkryjemy, że materia *jest* uporządkowana i tworzy jądra atomowe, atomy i cząsteczki, które wypełniają układ okresowy pierwiastków oraz podręczniki fizyki i chemii – i po raz kolejny przekroczymy tę granicę.

Mimo wszystko prawa tworzące Rdzeń wymagają wprowadzenia informacji o stanie Wszechświata w *jakimś* czasie i bez takiej wiedzy nie pozwolą nam opisać, jak powstaje świat. Nie pokazują rzeczywistości z punktu widzenia Boga, który jednym spojrzeniem obejmuje całą czasoprzestrzeń jako jedność. Równania te nie działają w całym „obiektywnym świecie”, jak nazwał go Weyl, ale jedynie na jego wycinkach.

Dzięki ogólnej teorii względności uświadomiliśmy sobie, że dzielenie czasoprzestrzeni na przestrzeń i czas jest czymś nienaturalnym. Z kosmologii Wielkiego Wybuchu, którą zajmiemy się w rozdziale 6, płynie wniosek, że na samym początku Wszechświat był nadspodziewanie prosty. To są ważne wskazówki przemawiające za tym, że powinniśmy poszukiwać ogólniejszych praw, które pozwolą nam dostrzec całościową wizję wszystkiego.

21 Mówiąc tutaj o „podstawowych” prawach, mam na myśli te, których nie można wyprowadzić, nawet w zasadzie, z innych praw. Różne inne prawa mają duże znaczenie i odgrywają istotną rolę w naszym pojmowaniu natury, choć wcale nie są to prawa „podstawowe” w takim rozumieniu tego słowa. Dobrym tego przykładem może być druga zasada termodynamiki.

22 Określenia „pole fotonowe” i „pole elektromagnetyczne” znaczą to samo.

23 A także niewielką liczbę antykwarków, ale to niepotrzebna w tym miejscu komplikacja, nie będziemy więc o tym mówić.

24 Z trzeciej zasady dynamiki Newtona wynika, że akcja jest równa reakcji, czyli że jeśli jedno ciało działa na drugie z pewną siłą, to drugie również oddziałuje na pierwsze z siłą o takiej samej wartości.

25 W tym miejscu traktujemy czasoprzestrzeń tak, jak każdy obiekt geometryczny. Po dodaniu czasu do przestrzeni otrzymujemy obiekt geometryczny – czasoprzestrzeń – który ma jeden wymiar więcej niż sama przestrzeń, ale nie zmienia to faktu, że nadal możemy go opisywać za pomocą pojęć geometrycznych.

26 Dotyczy to również cząstek omówionych w dodatku.

27 Postulowane przez tę teorię hipotetyczne struny są niezwykle małe i bardzo sztywne, co sprawia, że trudno jest je wykryć i niełatwo wprawić w drgania.

28 Ten aspekt oddziaływania słabego zostanie omówiony w rozdziale 8.

29 Więcej na ten temat powiemy w rozdziale 8.

30 Należy jednak pamiętać, że w obliczeniach tego typu zakładamy, iż nasze prawa obowiązują na obszarach daleko wykraczających poza wszystko, co udało nam się sprawdzić, i nawet wówczas równość siły oddziaływań jest tylko przybliżona. Wypowiadając się ostrożniej, wypadałoby stwierdzić, że wyniki tych obliczeń prowadzą do powstania podejrzanego „zbiegu okoliczności”.

# 5

# Istnieje mnóstwo materii i energii

W poprzednich rozdziałach mówiliśmy o obfitości przestrzeni i czasu. W obu przypadkach doszliśmy do czterech wniosków o znaczeniu podstawowym. Po pierwsze, zauważyliśmy, że Wszechświat zawiera ogromne bogactwo. Po drugie, uświadomiliśmy sobie, że w praktyce mamy dostęp jedynie do niewielkiego ułamka tych bogactw. Po trzecie, okazało się, że ten ułamek, który jest nam dany, w zupełności wystarcza. I wreszcie, po czwarte, doszliśmy do wniosku, że w żadnym razie nie udało nam się jeszcze w pełni wykorzystać nawet tego, do czego mamy dostęp. Mamy jeszcze mnóstwo miejsca na to, by się rozwijać.

W tym rozdziale przyjrzymy się obfitości materii i energii. Również tutaj dojdziemy do takich samych czterech podstawowych wniosków.

## OBFITOŚĆ KOSMICZNEJ ENERGII

Zacznijmy od kilku porównań, by przybliżyć sobie miarę kosmicznej energii i podjąć próbę wyrażenia jej w ludzkiej skali. Przeciętny dorosły człowiek pobiera w ciągu dnia energię wynoszącą około 2000 kilokalorii. Tyle energii w przybliżeniu wystarcza do tego, by mogła się bez przerwy świecić stuwatowa żarówka. W ciągu roku daje to 3 miliardy dżuli. (Jeden dżul jest ilością energii, jaka jest potrzebna, by zapewnić jeden wat mocy w ciągu jednej sekundy, a w roku jest około 30 milionów sekund). Przyjmijmy, że taką porcję energii będziemy oznaczać skrótem REC, od Roczna Energia Człowieka. Z całej tej ilości około 20 procent jest zużywane na podtrzymanie pracy mózgu.

W 2020 roku światowe zużycie energii wynosiło około $1{,}9 \times 10^{11}$ – czyli 190 miliardów – REC-ów. Ponieważ populacja ludzi na świecie w 2020 roku wynosiła około 7,5 miliarda osób, to oznacza, że przeciętny człowiek wykorzystał około 25 REC-ów energii. Ta liczba – 25 – jest stosunkiem całkowitej energii zużywanej przez człowieka do ilości energii pobieranej na drodze naturalnego metabolizmu. Jest to obiektywna miara gospodarczego postępu ludzkości świadcząca o tym, że potrzebujemy energii nie tylko po to, by zapewnić sobie przetrwanie. Dla porównania Amerykanie zużywają około 95 REC-ów na osobę.

Roczna produkcja energii na Słońcu wystarcza, by każdy mieszkaniec Ziemi otrzymał około 500 bilionów REC-ów. Nie powinno umknąć nasze uwadze, że 500 bilionów to dużo więcej niż 25, a nawet 95. Oznacza to, że teoretycznie rzecz biorąc, mamy jeszcze bardzo dużo miejsca na to, by rozwijać się gospodarczo tylko dzięki wykorzystaniu większego ułamka energii wytwarzanej przez Słońce.

Oczywiście, Słońce wypromieniowuje swoją energię we wszystkich kierunkach. Aby przechwycić większą część tej energii, musielibyśmy zainwestować mnóstwo czasu i środków w budowę gigantycznych kolektorów energii w przestrzeni kosmicznej. Freeman Dyson i inni uczeni przygotowali już nawet projekty techniczne tego rodzaju urządzeń, które nazywa się sferami Dysona.

Jeśli powściągniemy nieco ambicje i ograniczymy się do tej części energii słonecznej, która dociera do powierzchni Ziemi, to okaże się, że jest to wartość „tylko” 10 000 razy większa od obecnego całkowitego zużycia energii. Ta liczba może stanowić podstawę do snucia bardziej realistycznych planów wykorzystania gospodarczego potencjału energii słonecznej. Jak widać, nawet bez sfery Dysona wciąż mamy *mnóstwo* zapasowej energii, by się rozwijać.

Wzięliśmy tu pod uwagę energię wytwarzaną przez Słońce. Wcześniej, gdy opisywaliśmy Wszechświat, przekonaliśmy się, że jest ono tylko jedną z wielu gwiazd. Jeśli to sobie uświadomimy, to zrozumiemy, że cały Wszechświat jest skąpany w energii o wartości wielokrotnie przekraczającej wszystko, co ludzie będą mogli wykorzystać w dającej się przewidzieć przyszłości. Możemy jednak przechwytywać tylko niewielkie próbki docierające do nas z tych rozsianych w kosmosie źródeł. Właśnie tym zajmuje się astronomia. Być może badania astronomiczne nie

przyczyniają się bezpośrednio do rozwoju gospodarczego, ale na pewno służą rozwojowi naszej wiedzy.

Te porównania wyraźnie pokazują, że nie ma żadnej przesady w stwierdzeniu, iż istnieje mnóstwo materii i energii. Jest jej więcej niż potrzeba do powstania istot tak skomplikowanych i dynamicznych jak ludzie, nie zbraknie jej też do realizacji ambitnych planów gatunku ludzkiego[31].

## PODSTAWY I CEL LUDZKOŚCI

### *Dynamiczna złożoność*

Analizując te proste porównania, pokazaliśmy, że z punktu widzenia ludzkich potrzeb we Wszechświecie jest mnóstwo energii. Teraz zastanówmy się, spoglądając z nieco bardziej fundamentalnej perspektywy, *dlaczego* tak jest.

Aby to było możliwe, musimy odpowiedzieć na dwa podstawowe pytania:

> Co takiego w fizycznym Wszechświecie jest ucieleśnieniem „celu ludzkości”?
> Dlaczego zrealizowanie tego celu wymaga tak niewielkiej energii w porównaniu z ilością energii wytwarzanej przez Słońce?

Na pierwsze pytanie można szukać odpowiedzi na wielu różnych poziomach. Jeśli pokusimy się o próbę podania dokładnej definicji „celu ludzkości”, możemy szybko ugrzęznąć w odmętach niejasnej metafizyki. Jeżeli jednak zastanowimy się, co odgrywa kluczową rolę w działaniach ludzi i jaką fizyczną postać ma ten najważniejszy czynnik, to odpowiedź okaże się jaśniejsza niż samo pytanie. Na takim poziomie sednem wszystkiego jest *złożoność dynamiczna*. Choć uczeni nie potrafią dojść do porozumienia, jak należy dokładnie definiować złożoność, to jednak „wiemy, czym ona jest, gdy ją widzimy”. Najlepiej świadczą o tym następujące przykłady:

• Gdy się uczymy i myślimy, w naszym mózgu zmienia się wzór połączeń, rodzaj wytwarzanych substancji i przepływ impulsów elektrycznych. Odbierając bodźce ze świata zewnętrznego, przetwarzamy docierające do nas wzorce promieniowania elektromagnetycznego (wzrok), ciśnienia powietrza (słuch), składu substancji chemicznych (smak i węch) i kilku innych rodzajów danych, przekształcając je do postaci sygnałów występujących w mózgu. Aby się poruszać i wpływać na świat, korzystamy z siły naszych mięśni, które w ostatecznym rozrachunku działają w wyniku synchronicznego kurczenia się dobrze zorganizowanych cząsteczek białka.
• Budując świątynie, synagogi, meczety czy katedry, ludzie rysują plany, gromadzą potrzebne materiały oraz zatrudniają budowniczych i artystów do stworzenia złożonych, „nienaturalnych”, „uduchowionych” obiektów, które wcześniej w ogóle nie istniały.
• Muzyka i różne rytuały są czystym wyrazem dynamicznej złożoności.

Każda z tych typowo ludzkich aktywności wiąże się w istocie z powstawaniem skomplikowanych struktur materialnych, które zmieniają się w czasie. W poszczególnych przypadkach przyjmują one różną postać, od sieci neuronowych po drgania powietrza, i są ucieleśnieniem różnych zjawisk, między innymi narzędzi, symboli, wspomnień, sygnałów, instrukcji i działań poszczególnych osób. Zawsze jednak podstawę głębokiej struktury tych aktywności stanowi dynamiczna złożoność.

Tu, na Ziemi, przez większą część historii rozwoju organizmów żywych i dziejów ludzkości fizycznym przejawem dynamicznej złożoności było tworzenie i rozbijanie ogromnej liczby wiązań chemicznych dzięki wykorzystaniu energii wytwarzanej przez Słońce. Obecnie otwierają się przed nami nowe możliwości, o których za chwilę powiemy coś więcej. Jednak napędzane energią słoneczną tworzenie i rozbijanie wiązań chemicznych nadal pozostaje najważniejsze i właśnie od niego powinniśmy zacząć.

# EKSPLOZJA TWORZENIA

Atomy mają wiele cech, które sprawiają, że doskonale nadają się do budowania interesujących i misternych – czyli złożonych – obiektów:

• Istnieje wiele rodzajów atomów, ponieważ każdemu pierwiastkowi odpowiada inny typ atomu. Wszystkie atomy jednego pierwiastka są w zasadzie jednakowe[32]. Dzięki temu mamy dostęp do dużego zapasu części zamiennych.
• Atomy występują w ogromnych ilościach. Ciało przeciętnego człowieka zawiera mniej więcej kwadryliard atomów – jest to wartość większa od liczby gwiazd w obserwowalnym Wszechświecie.
• Atomy mogą się ze sobą łączyć w większe jednostki – cząsteczki – zgodnie z zasadami teorii kwantowej i prawami elektrodynamiki. Mówimy, że atomy w cząsteczce są połączone wiązaniem chemicznym.

Aby zrozumieć, jak te podstawowe fakty mogą w sprzyjających warunkach prowadzić do powstania dynamicznej złożoności w dużej skali, musimy dodać dwa nowe pojęcia, którymi są eksplozja kombinatoryczna i stabilność tymczasowa.

Eksplozja kombinatoryczna w swojej najprostszej postaci jest szybkim wzrostem liczby możliwości, w miarę jak dokonujemy kilku niezależnych wyborów. Jeśli na przykład chcemy zapełnić dziewięć miejsc w liczbie, wybierając dowolną z dziesięciu cyfr, to mamy $10^9$, czyli miliard różnych możliwości, a mianowicie są to liczby: 000 000 000, 000 000 001, 000 000 002, …, 999 999 999. Dziewięć i dziesięć to dość małe liczby, ale $10^9$ to jest już bardzo dużo.

Na DNA składają się cztery różne nukleotydy (są to: guanina, adenina, tymina i cytozyna, oznaczane literami G, A, T i C), które mogą się doczepić do odpowiednich miejsc na długiej nici ufosforylowanego cukru. Na jednej nici może istnieć wiele tysięcy takich miejsc. Podobnie białka powstają przez dołączanie dwudziestu aminokwasów do nici o zmiennej długości. Tego typu struktury wiążą się z eksplozją kombinatoryczną takiego samego typu jak w przypadku dziesiętnego rozwinięcia liczb, ale przy podstawie wynoszącej 4 lub 20. Dzięki temu nici DNA, które służą do

przechowywania informacji, mogą zawierać olbrzymią ilość danych. Natomiast białka, tworzące strukturalne i funkcjonalne elementy składowe organizmów żywych, występują w ogromnej różnorodności. Różne białka zwijają się w przeróżny sposób, dzięki czemu powstają cząsteczki w olbrzymiej liczbie kształtów i rozmiarów, a każda ma inne własności mechaniczne i elektryczne.

Innego rodzaju cząsteczki, zarówno organiczne, jak i związki tworzące materię nieożywioną, mogą się rozgałęziać, tworzyć pętle, łączyć się w membrany, układać w regularną strukturę kryształów i tworzyć jeszcze wiele innych struktur. To bogactwo możliwości prowadzi do eksplozji kombinatorycznej do kwadratu. Gdy uświadomimy sobie fakt, że w pojedynczym gramie materii znajdują się tryliony atomów, stanie się jasne, że materii mogącej tworzyć złożoność w największej skali jest pod dostatkiem. Gdy William Blake mówił poetycko o „zamknięciu bezmiaru” w ściśniętej dłoni, to miał ku temu solidne podstawy naukowe.

## WYMYŚLANIE ZŁOŻONOŚCI

Aby wykorzystać możliwości, jakie daje materia, musimy opanować sztukę jej kształtowania. Chcielibyśmy, żeby nasze elementy składowe w postaci atomów, niczym klocki Lego lub modele cząsteczek budowane z kulek i patyczków na lekcjach chemii, można było łatwo ze sobą łączyć, równie łatwo rozkładać – i żeby między jedną i drugą czynnością pozostawały w ustalonym przez nas stanie. Ta kluczowa własność, *tymczasowa stabilność*, wymaga osiągnięcia równowagi między stabilności i zmiennością.

Praca chemików ma na celu ustalenie, *co jest realistycznie możliwe* w świecie cząsteczkowej złożoności, natomiast biolodzy starają się określić, *co się faktycznie wydarzyło*. Badania chemików i biologów nie mają określonego końca i zawsze są niezmiernie fascynujące. Liczę na to, że uczeni ci wykażą się dobrą wolą i spojrzą z poczuciem humoru na daleko idące uproszczenia, jakich się tu dopuszczam. Jedyną rzeczą, którą możemy zrozumieć dość prosto – i którą tutaj opiszemy – jest to, w jaki sposób świat, a w szczególności układ Słońca i Ziemi, ukształtował się „specjalnie”

tak, by tworzenie się skomplikowanych struktur materii było *w ogóle możliwe*.

Istnieją trzy kluczowe elementy, które przyczyniają się do powstania tymczasowej stabilności. Są to: wysoka temperatura, niska temperatura i zakres energii pośrednich. Wysoką temperaturą jest w naszym przypadku temperatura powierzchni Słońca, która wynosi około 6000°C. Niską – temperatura panująca na powierzchni Ziemi, czyli około 20°C. Pośrednią skalą energii jest ilość energii, jaka jest potrzebna do utworzenia lub rozbicia typowego wiązania chemicznego – jest to mniej więcej jeden elektronowolt.

W temperaturze około 20°C cząsteczki pozostają elastyczne z mechanicznego punktu widzenia, ale rzadko dochodzi do zerwania ich wiązań chemicznych, ponieważ docierająca do nich energia zwykle nie osiąga wartości jednego elektronowolta. Natomiast fotony przylatujące z powierzchni Słońca przynoszą ze sobą większą energię, o wartości często przekraczającej jeden elektronowolt. Mogą więc rozbijać wiązania chemiczne. Kontrast między chłodnym, ale nie zamarzniętym tłem i łatwo dostępną, ale nie w nadmiarze, skoncentrowaną energią pozwala zmieniać strukturę wzorów cząsteczkowych, choć nie jest to przesadnie łatwe. Tego rodzaju tymczasowa stabilność występująca na Ziemi jest właśnie tym, czego potrzeba z fizycznego punktu widzenia, by mogła powstać dynamiczna złożoność.

Aby dokończyć naszą opowieść o ogromnym potencjale powstawania dynamicznej złożoności i o tym, jak proces ten przebiega na Ziemi, musimy zrozumieć na poziomie podstawowym, w jaki sposób Słońce spełnia swoją funkcję. Zanim jednak do tego przejdziemy, zatrzymajmy się na chwilę, by uświadomić sobie ogrom dynamicznej złożoności, która drzemie w każdym z nas.

Podstawowymi elementami ludzkiego mózgu są neurony. Jest ich około stu miliardów, czyli 100 000 000 000 (a w zapisie potęgowym $10^{11}$). Choć jest to liczba o wiele mniejsza od kwadryliarda, to i tak niewyobrażalnie duża. W przybliżeniu jest równa liczbie gwiazd w naszej Galaktyce.

Każdy neuron jest sprytnym, małym urządzeniem do przetwarzania informacji. Pojedyncze neurony łączą się ze sobą, tworząc wiele połączeń. Typowy neuron może mieć setki, a nawet tysiące połączeń z innymi neuronami. Znaczna część naszej wiedzy jest zakodowana w postaci

zmiennej siły tych połączeń, kształtowanych w wyniku procesu, podczas którego użyteczne wzorce ulegają wzmocnieniu, natomiast niepotrzebne zanikają. Największa liczba nowych połączeń powstaje między drugim i trzecim rokiem życia, ale największa złożoność utworzonej struktury pojawia się później, gdy już dojdzie do usunięcia wielu niepotrzebnych połączeń.

Jeśli spróbujemy obliczyć, na ile sposobów mogą się połączyć neurony w liczbie występującej w ludzkim mózgu, to otrzymamy wartość, od której kręci się w głowie – o wiele większą od kwadryliarda. W ludzkim mózgu dochodzi do zdumiewającej eksplozji kombinatorycznej. Nie powinno nas więc dziwić, że taka niewyobrażalnie duża liczba neuronów połączonych w niewyobrażalnie skomplikowany sposób i zgodnie ze sobą współpracujących może dokonać zadziwiających rzeczy. Walt Whitman naprawdę zawierał miliony. Tak samo ty. I ja.

## PALIWO DO POWOLNEGO SPALANIA

Słońce jest zasilane paliwem jądrowym. W gruncie rzeczy jest gigantycznym reaktorem. Zachodzący w Słońcu proces spalania paliwa jądrowego polega na przekształcaniu wodoru w hel. Atom wodoru składa się z jednego protonu i jednego elektronu. W atomie helu znajdują się dwa protony, dwa neutrony i dwa elektrony. We wnętrzu Słońca zachodzi cały łańcuch reakcji, których wynikiem jest przekształcenie czterech atomów wodoru w jeden atom helu i dwa neutrina oraz uwolnienie pewnej energii.

Jeśli przypomnimy sobie analizę rozpadu neutronu, którą przeprowadziliśmy w poprzednim rozdziale, to może nam się wydać, że w powyższym opisie tkwi jakiś błąd. Mówiliśmy wówczas, że swobodne neutrony przekształcają się w protony. W tym procesie rozpadu dochodzi do uwolnienia energii, ponieważ neutrony są nieco cięższe od protonów. Teraz natomiast, opisując spalanie paliwa jądrowego w Słońcu, nakreśliliśmy odwrotny proces, w którym protony zmieniają się w neutrony. Nie jest to jednak błąd. W jądrze helu działają potężne siły przyciągające protony i neutrony, które powstają za sprawą oddziaływania silnego. Łącząc ze sobą oddzielne elementy tego jądra, możemy zyskać energię. Oznacza to, że

protony da się zmienić w *związane* neutrony, a przy okazji zaoszczędzić jeszcze trochę energii.

W przekształceniach protonów w neutrony i odwrotnie musi uczestniczyć oddziaływanie słabe. Z tego powodu rozpad neutronu jest dość powolnym procesem w porównaniu z innymi zjawiskami zachodzącymi w fizyce cząstek, jak mówiliśmy już wcześniej. W trakcie spalania paliwa jądrowego w Słońcu powolność oddziaływania słabego staje się jeszcze bardziej zauważalna. Aby w ogóle mogło dojść do tego procesu, uczestniczące w nim cząstki muszą się najpierw znaleźć blisko siebie. Jednak takie spotkania trwają bardzo krótko, czas na „nawiązanie bliższej relacji" rośnie więc bardzo powoli. Efekt jest taki, że muszą upłynąć całe miliardy lat, zanim protony w Słońcu ulegną przekształceniu w (związane) neutrony. Zatem, na całe szczęście, zapasy paliwa jądrowego w Słońcu wystarczą jeszcze na kilka miliardów lat. Ponadto we wnętrzu Słońca znajduje się bardzo dużo wodoru i nawet mimo tak powolnego spalania powstaje energia w ilości wystarczającej, by nasza rodzima gwiazda mogła świecić.

## PODSUMOWANIE: JESTEŚ WŁAŚNIE TYM

W ten sposób zakończyliśmy opis procesu powstania na Ziemi dynamicznej złożoności z punktu widzenia fizyki fundamentalnej. Dzięki temu udało nam się osadzić biologię, a w ostatecznym rozrachunku również psychologię i gospodarkę, w szerszym kontekście głębokiego zrozumienia materialnej rzeczywistości.

Każde z czterech podstawowych oddziaływań odgrywa w tej opowieści inną, ale zawsze kluczową rolę. Dzięki grawitacji Ziemia krąży po orbicie wokół Słońca, utrzymując się w odpowiedniej odległości zapewniającej równowagę temperatur, która sprzyja powstaniu dynamicznej złożoności. Siła elektromagnetyczna, opisana w elektrodynamice kwantowej, splata ze sobą atomy, tworząc cząsteczki. Oddziaływanie silne, którym zajmuje się chromodynamika kwantowa, jest źródłem siły przyciągającej, dzięki której może dochodzić do reakcji spalania jądrowego. Oddziaływanie słabe odpowiada za przekształcenia, które pozwalają na kontynuację spalania jądrowego, ale bardzo powoli.

# PRZYSZŁOŚĆ OBFITOŚCI MATERII

*Nowe miejsca, nowe elementy, nowe umysły*

Pomysł, że istotę ludzkiej działalności można wyrazić za pomocą przepływu informacji w ramach dynamicznej złożoności, a nie przez opisywanie szczegółów procesów chemicznych i fizjologicznych, jest jednocześnie odkrywczy i wyzwalający. Wymaga wyobrażenia sobie, że świadome umysły mogą powstawać również w innych miejscach Wszechświata, i przygotowuje nas do tego, że być może kiedyś będziemy musieli uwzględnić te umysły w naszym kręgu empatii.

Aby ludzkie ciało mogło się właściwie rozwijać, muszą być zapewnione odpowiednie warunki. Temperatura musi się mieścić w wąskim zakresie wartości, powietrze musi zawierać mieszankę odpowiednich cząsteczek i być wolne od toksyn, konieczny jest dostęp do wody i składników odżywczych, musi też być zapewniona osłona przed promieniowaniem ultrafioletowym i promieniami kosmicznymi. Takie warunki istnieją w wąskiej warstwie w pobliżu powierzchni Ziemi, ale bardzo rzadko występują we Wszechświecie jako całości. Kolonizacja przestrzeni kosmicznej przez człowieka, którego ciało jest przystosowane do warunków panujących na Ziemi, okazuje się szaleńczo trudnym przedsięwzięciem.

O wiele łatwiejsze jest rozszerzenie strefy wpływu ludzkiej informacji. Jest to dużo bardziej realistyczny cel, a jego znaczenie wcale nie jest mniejsze. Wysyłane przez nas urządzenia i czujniki mogą budować różne struktury i prowadzić badania w naszym imieniu, pozostając z nami w stałym kontakcie.

Dzięki głębokiemu zrozumieniu materii zyskaliśmy kilka możliwości wytwarzania wielkoskalowej złożoności dynamicznej, które nie muszą polegać na tworzeniu i rozrywaniu wiązań chemicznych. Możemy wspomóc, a nawet zastąpić chemię urządzeniami elektronicznymi i fotonicznymi.

Fotografia cyfrowa jest przekonującym, dojrzałym przykładem tego, jak może to wyglądać. W tym przypadku podstawowe czujniki – matryce CCD – zliczają elektrony uwalniane przez fotony i zapisują uzyskane wyniki w postaci ciągów zer i jedynek, kodując informację zgodnie z jednym

z przyjętych formatów. Tak zebrane dane opisujące obraz można przetwarzać w różnoraki sposób. Możemy na przykład usunąć szum, uwypuklić interesujące cechy lub w inny sposób upiększyć obraz. Następnie, po przetworzeniu, tę informację da się przekształcić ponownie do postaci obrazu zrozumiałego dla człowieka, wykorzystując uzyskane dane do sterowania wyświetlaczem. Wszystkie te działania wykonuje się za pomocą układów elektronicznych mieszczących się w komputerach lub specjalistycznych układach scalonych. Klisze fotograficzne, emulsje i ciemnie, dzięki którym fotografię otaczała kiedyś aura romantyczności i tajemnicy – ale jednocześnie wszystko to sprawiało, że sztuka fotografii była bardzo czasochłonna i trudna do opanowania – są w całkowitym odwrocie.

Zmieniające się wzory połączeń i zasilana chemicznie aktywność elektryczna ludzkiego mózgu są obecnie szczytowym osiągnięciem dynamicznej złożoności i umysłu. Jednak nieustannie zwiększa się znaczenie innych fizycznych przejawów dynamicznej złożoności i istnieje wiele możliwości ich rozwoju.

W nowoczesnych komputerach informację przechowuje się i przetwarza przez układanie i przestawianie elektronów, a nie całych atomów czy cząsteczek, jak to się dzieje w mózgu. Wymaga to o wiele mniejszej energii i pozwala na dużo szybsze przetwarzanie danych. Gdy zapisujemy informację, w każdej maleńkiej komórce – których mogą być miliardy, a nawet biliony – powstaje albo duże, albo małe zagęszczenie elektronów. W pierwszym przypadku prowadzi to do uzyskania niskiego napięcia, które interpretuje się jako „0”, a w drugim pojawia się wysokie napięcie i stan interpretowany jako „1”. W ten sposób możemy otrzymać eksplozję kombinatoryczną jednostek znajdujących się w stanie tymczasowo stabilnym. W efekcie powstaje uniwersalny system do tworzenia dynamicznej złożoności.

Zamiast tworzyć (lub nie) skupiska elektronów, możemy również kodować cyfry 0 i 1 za pomocą kierunku spinu pojedynczej cząstki, wykorzystując fakt, że spin jest zwrócony do góry lub na dół. Zmiana kierunku spinu wymaga większej precyzji niż przepychanie ładunków, ale przynajmniej w zasadzie może być to rozwiązanie szybsze i oszczędniejsze z energetycznego punktu widzenia. Możemy też wykorzystywać fotony

zamiast elektronów i mierzyć gęstość ich skupisk (amplituda), barwę (długość fali) lub spin (polaryzacja).

Takie postchemiczne systemy do uzyskiwania dynamicznej złożoności mają ogromną przewagę pod względem szybkości działania, rozmiarów i wydajności energetycznej. Są również bardziej otwarte na możliwość korzystania w sposób kontrolowany z bogactw świata kwantowego[33]. Mogą pozwolić na nieograniczony rozrost umysłu w kosmosie przez bardzo długi czas i w ogromnej skali.

*Jak sprawy mogłyby przybrać zły obrót*

> Z wielką mocą wiąże się wielka odpowiedzialność.
>
> Peter Parker (Spiderman)

W naszym opisie podstaw świata fizycznego najczęściej przewijającym się przesłaniem jest zapewnienie, że istnieje mnóstwo przestrzeni, czasu, materii i energii. Świat ma nam do zaoferowania dużo większą, dłuższą i bogatszą przyszłość niż wszystko, co zdołaliśmy do tej pory osiągnąć – jeśli tylko tego nie zepsujemy.

Wiele rzeczy mogłoby się nie udać. W przeszłości ludzkość dziesiątkowały plagi powodujące ogromne straty, podobny skutek miały też trzęsienia ziemi i wybuchy wulkanów. Niefortunne zderzenie Ziemi z kosmicznymi odłamkami skalnymi przyczyniło się do zagłady dinozaurów. Możemy przeciwdziałać tego typu katastrofom i powinniśmy to robić. Jednak teraz, na zakończenie rozdziału, chciałbym krótko omówić dwa zagrożenia, które w dzisiejszym świecie są szczególnie niepokojące i ściśle łączą się z poruszaną tu tematyką.

Słońce dostarcza do Ziemi jednostajnym strumieniem energię w ilości o wiele większej, niż tego obecnie potrzebujemy. Inżynierowie nieustannie konstruują nowe rozwiązania techniczne pozwalające przechwycić większy ułamek tej energii i jest raczej pewne, że w dającej się przewidzieć przyszłości – jeśli tylko nie dojdzie do jakiegoś nieszczęścia – będziemy mogli ją wykorzystać do zasilania w wydajny sposób jeszcze bogatszej gospodarki świata.

Jednak w chwili obecnej o wiele łatwiejsze i prostsze jest korzystanie z energii słonecznej, którą rośliny przechwyciły w zamierzchłej przeszłości

i która obecnie jest przechowywana w postaci paliw kopalnych – węgla i ropy naftowej. Niestety, spalanie tych paliw na dużą skalę prowadzi do uwolnienia do atmosfery dwutlenku węgla i innych zanieczyszczeń w ilościach wystarczających do zmiany jej właściwości. W zanieczyszczonej atmosferze dochodzi do uwięzienia większej części energii słonecznej, co prowadzi do wzrostu średniej temperatury na Ziemi. To właśnie pierwszy kryzys wywołany przez człowieka, który obecnie nam zagraża.

Nasza siostrzana planeta, Wenus, jest pięknym klejnotem na nocnym niebie. Jednocześnie jednak jest również dla nas światłem ostrzegawczym. Jej atmosfera, bogata w dwutlenek węgla, bardzo sprawnie przechwytuje energię słoneczną. Temperatura na powierzchni Wenus osiąga wartość 460°C, a więc wystarczającą do roztopienia ołowiu. Z tego powodu nie mogą tam zachodzić skomplikowane procesy chemiczne. Wenus krąży znacznie bliżej Słońca niż Ziemia, to prawda, ale gdybyśmy umieścili ją na orbicie Ziemi, to na jej powierzchni nadal panowałaby zatrważająco wysoka temperatura wynosząca około 340°C. Ziemia nie rozgrzeje się aż tak bardzo w najbliższej przyszłości, ale nawet wzrost temperatury o kilka stopni będzie miał dramatyczny, a może nawet katastrofalny efekt. Ocieplenie powoduje topnienie lodu uwięzionego na biegunach, a to prowadzi do podniesienia się poziomu morza. Coraz częściej dochodzi do gwałtownych zjawisk pogodowych, które są wywołane wzrostem wilgotności atmosfery. W dodatku spowodowane przez człowieka ocieplenie utrudnia życie roślinom i zwierzętom wrażliwym na zmiany temperatury, stanowiąc bezpośrednie zagrożenie dla zasobów żywności (i naszych przyjaciół zamieszkujących razem z nami tę planetę).

Drugim zagrożeniem wywołanym przez człowieka jest broń jądrowa. Uczeni badający silne i słabe oddziaływania jądrowe odkryli możliwość wykorzystania nowych potężnych źródeł energii bazujących na spalaniu jądrowym, a nie chemicznym. Jak wszyscy wiemy, doprowadziło to do skonstruowania nowego rodzaju bomb o bardziej niszczycielskiej mocy. Gdyby znaczący ułamek tych bomb został faktycznie wykorzystany w jakimś konflikcie zbrojnym, wiele milionów ludzi zginęłoby okropną śmiercią, a ważne ośrodki cywilizacji zmieniłyby się w nienadające się do zamieszkania odludzia. Rozwój ludzkości poniósłby katastrofalną, a może nawet nieodwracalną szkodę.

Dobrodziejstwo rozwoju gospodarki i wiedzy naukowej niesie ze sobą poważne zagrożenia. Tych niebezpieczeństw *można* uniknąć. Czy to się *faktycznie* uda, pozostaje kwestią otwartą.

31 Nie omówiliśmy tu procesu, który doprowadził do pojawienia się ludzi, nie sprecyzowaliśmy też, na czym polegają te ambitne plany ludzkości ani jakie powinny być. Wszystkie te zagadnienia są niezwykle ważne, ale ich analiza to już materiał na zupełnie inną książkę.

32 Niektóre pierwiastki mogą występować w postaci kilku różnych izotopów. Atomy różnych izotopów mają podobne własności chemiczne, ale różnią się liczbą neutronów w jądrze. Wspomnieliśmy już o tej możliwości wcześniej, w rozdziale 2, przy okazji omawiania datowania radiowęglowego.

33 Pełny opis tego typu układów na gruncie mechaniki kwantowej jest o wiele bardziej złożony, niż się to wydaje z punktu widzenia fizyki klasycznej. W ostatnim rozdziale omówimy to bardziej szczegółowo. Dzięki temu otrzymujemy, przynajmniej teoretycznie, dużo większe możliwości, ale rozwiązania bazujące na takich układach zachowują się w dziwny sposób i trudno się z nimi pracuje. Informatyka kwantowa wciąż jeszcze znajduje się na początku swej drogi.

# II

# Początki i końce

# 6

# Historia kosmosu jest otwartą księgą

W pierwszej części omówiliśmy pięć podstaw opisujących składniki fizycznej rzeczywistości, którymi są przestrzeń, czas, pola, prawa i dynamiczna złożoność. W ten sposób odpowiedzieliśmy na pytanie o to, co istnieje. Kolejne dwie podstawy udzielą odpowiedzi na inne pytanie, które brzmi: „Jak to się stało, że Wszechświat jest taki, a nie inny?”.

Ludzie zastanawiali się nad pochodzeniem fizycznego świata od samego początku naszego istnienia. Antropolodzy spisali mity opisujące stworzenie świata, opowiadane w wielu różnych społecznościach. Jeszcze więcej tego typu opowieści znajdziemy w literaturze, a niektóre z nich w różnych czasach i miejscach były uważane za prawdę objawioną. Jednak odpowiednie narzędzia intelektualne i techniczne, pozwalające nam zająć się kwestią pochodzenia fizycznej rzeczywistości, znalazły się w zasięgu naszych możliwości dopiero w XX stuleciu.

W ostatnich kilku dziesięcioleciach udało nam się nakreślić wyraźny ogólny zarys kosmicznej historii. Kluczowe znaczenie w tych badaniach miały prace Hubble’a poświęcone wyznaczeniu odległości i ruchów galaktyk. Hubble odkrył, że odległe galaktyki uciekają od nas z prędkościami, które są proporcjonalne do ich odległości. Jeśli odtworzymy taką ekspansję kosmosu wstecz w czasie, to dojdziemy do wniosku, że materia musiała być kiedyś gęsto upakowana w jednym miejscu i Wszechświat wyglądał wtedy zupełnie inaczej niż obecnie.

Jaki był? W tym rozdziale spróbujemy znaleźć odpowiedź na to pytanie i w tym celu przyjrzymy się trzem ważnym kwestiom. Po pierwsze, przedstawimy śmiałą hipotezę opisującą stan Wszechświata na samym początku jego istnienia, znaną powszechnie jako teoria Wielkiego Wybuchu. Szczególnie będzie nas interesowała jej *dziwna* prostota. Po

drugie, nakreślimy przebieg historii kosmosu wynikający z przyjęcia takiej hipotezy. I wreszcie omówimy najważniejsze konsekwencje obserwacyjne wypływające z takiej historii oraz zebrane do tej pory dowody, które ją potwierdzają. Nakreślona przez nas historia sprawdziła się w tak wielu różnorodnych badaniach, że mamy pełne prawo uznać hipotezę leżącą u jej podstaw za uzasadnioną.

Mimo to należy przyznać, że liczba dowodów obserwacyjnych szybko się kurczy, a równania przestają dawać wiarygodne wskazówki, gdy skupiamy się na wydarzeniach zachodzących blisko samego początku. Pod koniec rozdziału omówimy obiecujące kierunki badań, zarówno teoretycznych, jak i obserwacyjnych, które pozwolą nam zajrzeć jeszcze głębiej.

## ZAKRES I OGRANICZENIA

Sama praca nauczy cię, jak ją należy wykonać.

Anonim (cytat z ciastka z wróżbą)

Praca naukowca bardzo często przypomina udział w teleturnieju *Va banque*, w którym odpowiedzi sugerują, jak brzmi poprawne pytanie. Wielki astronom i matematyk Johannes Kepler, jeden z bohaterów pierwszej części książki, rozważał w swoich pracach wiele różnych aspektów Układu Słonecznego. Stawiane przez niego pytania na temat kształtu orbit i prędkości ruchu planet doprowadziły go do dobrych[34] odpowiedzi, które obecnie są znane jako prawa Keplera. Jednak Kepler łamał sobie głowę również nad pytaniem o to, dlaczego istnieje akurat sześć planet (bo tyle wówczas znano) i dlaczego znajdują się w takiej, a nie innej odległości od Słońca. Zastanawiając się nad tym, doszedł do zabawnych koncepcji, które obejmowały muzykę – „muzyka sfer niebieskich” – i wielościany foremne. Jednak te idee nigdy nie przerodziły się w dobre odpowiedzi. Obecnie uczeni sądzą, że Kepler nie stawiał sobie właściwych pytań. Nasze podstawowe prawa i rozumienie historii kosmosu sugerują, że rozmiar i kształt Układu Słonecznego stanowią dość przypadkową cechę Wszechświata. Ostateczna postać naszego układu planetarnego wynika ze szczegółów procesu zapadania się mieszaniny gazu, skał i pyłu, która

przekształciła się w obserwowane obecnie ciała niebieskie. Dzisiaj widzimy, że Układ Słoneczny jest tylko jednym z wielu układów planetarnych istniejących we Wszechświecie. Wokół innych gwiazd krążą planety w różnej liczbie, tworząc układy zupełnie inne od tego, który próbował wyjaśnić Kepler. Również nasz obraz samego Układu Słonecznego bardzo się zmienił od czasów Keplera, ponieważ pojawiły się w nim nowe ciała niebieskie: Uran, Neptun, planetoidy, Pluton i wiele innych obiektów.

Historia kosmosu w zasadzie obejmuje bardzo szeroki zakres zagadnień, między innymi historię życia na Ziemi, historię Chin, Szwecji czy Stanów Zjednoczonych, historię rock and rolla i tak dalej. Jednak nikt przy zdrowych zmysłach nie będzie oczekiwał, że uda nam się to wszystko wyprowadzić z podstawowych zasad fizycznych.

Analizując historię kosmosu bazującą na podstawach fizyki, dowiemy się trzech rzeczy. Po pierwsze, otrzymamy bardzo niezwykły, ale wiele mówiący i przekonujący opis tego, jak wyglądał wczesny Wszechświat. Stanowi on dobrą odpowiedź na pewne ciekawe pytanie i okazuje się, że wynika z niego wiele zaskakujących wniosków, które można potwierdzić obserwacyjnie. Po drugie, poznamy ogólny zarys procesu, który doprowadził do powstania otaczających nas struktur – w tym również Układu Słonecznego. Po trzecie, wynikają z niego intrygujące nowe zagadki, takie jak pytanie o to, czym jest „ciemna materia”.

## CO SIĘ WYDARZYŁO

### *Dziwnie proste początki*

> Wszystko należy uprościć tak bardzo, jak się da, ale nie bardziej.
>
> Albert Einstein

Jak już mówiliśmy, odkrycie Hubble’a, które możemy ogólnie opisać jako „rozszerzanie się Wszechświata”, w zasadzie aż prosi się o to, by się zastanowić, co wydarzyło się wcześniej.

Sądząc na podstawie tego, co widzimy, zamieszkujemy Wszechświat, który jest pozostałością po kosmicznej eksplozji. Jeśli uda się nam zrozumieć sam początek, to być może wiedza ta pomoże nam w wyjaśnieniu również późniejszych wydarzeń.

Podejmując pierwszą próbę opisania początku, możemy sobie wyobrazić, że „oglądamy film odtwarzany od tyłu". Aby osiągnąć taki efekt, musimy jedynie odwrócić prędkości wszystkich galaktyk i pozwolić, by prawa fizyki zajęły się resztą[35]. Galaktyki pędzą na swoje spotkanie. Gdy odległość między nimi maleje, zaczynają się coraz silniej przyciągać grawitacyjnie i, poruszając się ruchem przyspieszonym z coraz większą prędkością, uwalniają energię. Materia miesza się ze sobą, a jej temperatura rośnie. Robi się gorąco. Atomy gubią elektrony i szybko poruszające się ładunki emitują promieniowanie jak szalone. Ciasno upakowane, prędko poruszające się protony i neutrony zaczynają się gotować, zmieniając się w zupę kwarków i gluonów. Nasza zdobyta z wysiłkiem wiedza na temat podstawowych oddziaływań na coś się w końcu przydaje. Szczególnego znaczenia nabiera swoboda asymptotyczna, z której wynika, że w takiej sytuacji musiało dojść do ważnego uproszczenia – w wysokiej energii wszystkie komplikacje związane z oddziaływaniem silnym przestają obowiązywać. Niesłychanie gorąca i gęsta materia jest zaskakująco prosta do opisania – wystarczy do tego znajomość podstawowych procesów.

Zanim jednak podejmiemy próbę rekonstrukcji przeszłości, musimy się zmierzyć z *ważnym* problemem pojęciowym. Od tego zależy historia całego Wszechświata. Ów problem jest następujący: nakreślony przed chwilą prosty obraz wynikający z odtworzenia wstecz kosmicznej ekspansji jest rozpaczliwie niestabilny. Tak naprawdę powinniśmy się spodziewać, że gdy cała materia pędzi na swoje spotkanie, to gwiazdy, planety, obłoki gazu i wszystko, co istnieje w kosmosie, za sprawą nieubłaganego przyciągania grawitacyjnego przekształcą się w gigantyczne czarne dziury. Oddziaływania niegrawitacyjne rzeczywiście wymagają, by niezwykle gęsta materia o ogromnej energii miała postać gorącego, jednorodnego gazu. Tak wygląda preferowany przez nie stan równowagi, do którego będą się starały doprowadzić. Jednak grawitacja nienawidzi jednorodności. Nade wszystko chce tworzyć skupiska i będzie dążyła do tego, by taka nadzwyczaj gęsta materia pogrupowała się w czarne dziury. Gdybyśmy nie wiedzieli, co się wydarzy, i gdybyśmy przeprowadzili analizę

z bezwzględną uczciwością, to odtwarzając nasz kosmiczny film wstecz w czasie, powinniśmy „przewidzieć”, że grawitacja zwycięży i wczesny Wszechświat przekształci się do postaci czarnych dziur, które popędzą na swoje spotkanie i połączą się w coraz większe czarne dziury. Gdyby jednak wczesny Wszechświat faktycznie tak wyglądał, to – odtwarzając nasz film ponownie w przód – uzyskalibyśmy kosmos, w którym praktycznie cała materia jest związana w postaci czarnych dziur. Gdy coś już raz wpadnie do czarnej dziury, to ma ogromne trudności, by się stamtąd wydostać!

Wszechświat, który obserwujemy wokół siebie, w żadnym razie nie zgadza się z takim przewidywaniem. Nasz Wszechświat, gdy uśrednimy go w ogromnej międzygalaktycznej skali, jest niezwykle jednorodny. W którąkolwiek stronę nieba spojrzymy, jeśli weźmiemy pod uwagę odpowiednio duży jego kawałek, zawsze odkryjemy galaktyki takiego samego rodzaju, rozrzucone w przestrzeni z taką samą częstością. To było kolejne przełomowe odkrycie Hubble’a. Ponieważ grawitacja dąży do tego, by wszystko było mniej jednorodne, fakt, że obecnie obserwujemy jednorodność w dużych skalach, sugeruje, iż na wczesnych etapach swojej historii Wszechświat musiał być jeszcze bardziej jednorodny. Oznacza to, że podczas odtwarzania naszego kosmicznego filmu wstecz w czasie materia musi biec na swoje spotkanie „w odpowiedni sposób”, precyzyjnie zaaranżowany, tak by uniknąć łączenia się pod wpływem grawitacji.

W teorii Wielkiego Wybuchu opisującej historię kosmosu występuje naiwny obraz wczesnego Wszechświata jako zbiorowiska gorącego, jednorodnego gazu, który przedstawiliśmy na początku, zanim zaczęliśmy się martwić jego niestabilnością. Omawiając tę teorię, zwyczajnie pomija się takie ryzyko. Zasadniczo więc teoria Wielkiego Wybuchu jest dziwnym zestawieniem dwóch przeciwstawnych idei. Zakłada pełną *równowagę* oddziaływań niegrawitacyjnych i jednocześnie maksymalną *nierównowagę* w odniesieniu do siły grawitacyjnej. Analiza ewolucji rozszerzającego się Wszechświata wstecz w czasie sugeruje pierwszą z tych sytuacji, gdy natomiast oglądamy ewolucję niemal jednorodnego Wszechświata do przodu w czasie, musimy uwzględnić drugi z tych przypadków. W teorii Wielkiego Wybuchu przyjmujemy oba założenia.

*Rozszerzająca się kula ognia*

Zaczynamy zatem od bardzo gorącego i niezwykle jednorodnego gazu. Zakładamy również, że przestrzeń, choć (zgodnie z ogólną teorią względności) mogłaby być zakrzywiona, jest w istocie płaska[36]. To jest *wszystko, co musimy wiedzieć*, by przedstawić pierwszą wersję kosmologii fizycznej.

Składniki gorącego gazu poruszają się we wszystkie strony tak szybko i oddziałują ze sobą tak często, że z punktu widzenia dynamiki osiągają stan równowagi, który przyjmuje postać równowagi termicznej. W niezwykle wysokich temperaturach, jakie występowały w najwcześniejszych chwilach Wielkiego Wybuchu, stan równowagi termicznej ma szczególnie duże znaczenie, ponieważ może się wówczas wydarzyć wiele rzeczy – i faktycznie się wydarzyło. Różne rodzaje cząstek, od fotonów po gluony, kwarki, antykwarki, neutrina, antyneutrina i wiele innych, powstają i znikają (czyli, co jest równoważne, ulegają emisji i absorpcji). W stanie równowagi wszystkie te cząstki są obecne w możliwych do przewidzenia ilościach. H.G. Wells trafnie uchwycił ducha równowagi termicznej w słynnym zdaniu: „Jeśli wszystko jest możliwe, to nic nie jest interesujące”. W równowadze termicznej panującej w niezwykle wysokiej temperaturze występuje całkowicie przewidywalna mieszanka wszystkich cząstek elementarnych.

Kolejną istotną cechą warunków panujących w bardzo wysokiej temperaturze jest to, że nie mogą wtedy istnieć żadne struktury – cząsteczki rozpadają się na atomy, atomy dzielą się na elektrony i jądra atomowe, jądra atomowe ulegają rozbiciu na kwarki i gluony i tak dalej. Mówiąc krótko, dochodzimy do samych podstaw.

Wychodząc od takich warunków początkowych – czyli od przewidywalnej mieszanki podstawowych składników – możemy wykorzystać znajomość podstawowych praw do ustalenia, co musiało się wydarzyć w kolejnym kroku. Wynik takich rozważań jest prosty: nasza wszechobecna kula ognia rozszerza się pod wpływem własnego ciśnienia, pokonując grawitację i ochładzając się, w miarę jak powiększa się jej rozmiar.

Gdy jej temperatura spada, dochodzi do dwóch szczególnie interesujących wydarzeń. Pierwszym jest fakt, że niektóre reakcje zachodzą coraz rzadziej,

aż w końcu całkowicie zanikają. Skutkiem tego procesu są długo utrzymujące się różnego rodzaju poświaty. Gdy na przykład temperatura spadła do odpowiednio niskiej wartości, fotony w kuli ognia przestały oddziaływać w znaczący sposób z pozostałą materią. Mówiąc prościej, niebo się przejaśniło i światło zaczęło się przemieszczać niemal swobodnie z jednego krańca Wszechświata w drugi, tak samo jak dzieje się to obecnie. Jednak fotony będące częścią kuli ognia wcale nie zniknęły. Zmieniły się w tak zwane kosmiczne promieniowanie tła, które jest trwałą poświatą wypełniającą Wszechświat.

Innym skutkiem spadku temperatury było to, że kolejne cząstki zaczęły się ze sobą łączyć. Kwarki połączyły się w protony i neutrony, elektrony dołączyły do jąder atomowych i tak dalej. W ten sposób ukształtowała się materia w znanej nam obecnie postaci.

Tak wygląda nasza pierwsza, wstępna wersja historii kosmosu.

## SKĄD TO WIEMY

Przeszłość nigdy nie umiera. Nie jest nawet przeszłością[37].

William Faulkner

Kosmiczna przeszłość nigdy nie jest martwa. Pozostały po niej ślady, które możemy dzisiaj obserwować. Kosmiczna przeszłość nie jest nawet przeszłością. Dzięki temu, że prędkość światła jest skończona, jego promienie docierające do nas z bardzo daleka przynoszą ze sobą przeszłość.

Odkrywanie tego, co wydarzyło się we wczesnym Wszechświecie, bardzo przypomina śledztwo mające na celu ustalenie przebiegu zbrodni. Badamy dowody, formułujemy teorie wyjaśniające przebieg wydarzeń i poszukujemy kolejnych dowodów, które by je potwierdzały. Gdy odkrywamy coś niespodziewanego, musimy poprawić, a czasami nawet zmienić dotychczasową teorię.

*Kosmiczny spis inwentarza*

Dzięki coraz lepszym teleskopom i kamerom, a także możliwości używania coraz potężniejszych komputerów do obróbki danych astronomowie zbadali Wszechświat na dużo większych odległościach i z większą dokładnością, niż było to możliwe w czasach Edwina Hubble'a. Dzięki jego pracom udało się wskazać głównego podejrzanego, którym okazał się Wielki Wybuch, a badania współczesnych naukowców jeszcze silniej potwierdziły te podejrzenia.

Jak już mówiliśmy, Hubble odkrył, że odległe galaktyki oddalają się od nas z prędkościami, które są proporcjonalne do ich odległości. Gdy przeanalizowaliśmy ten związek, rozważając ruch galaktyk wstecz w czasie, doszliśmy do koncepcji Wielkiego Wybuchu. Taką analizę możemy wykonać dość dokładnie w odniesieniu do pobliskich galaktyk, ale nie powinniśmy z góry zakładać, że taki sam wniosek uzyskamy również w przypadku najbardziej odległych obiektów. Uwzględniając wyłącznie proporcjonalność prędkości do odległości, nie zobaczymy na naszym filmie odtwarzanym do tyłu, jak odległe galaktyki zbiegają się w jednym czasie, ponieważ istotną rolę odgrywają w tym procesie również siły grawitacyjne, które zmieniają ruch. Jeśli jednak przyjmiemy Wielki Wybuch za punkt wyjścia, będziemy mogli przewidzieć, jak szybkość ekspansji powinna się zmieniać z czasem. Uwzględniając to przewidywanie, możemy wprowadzić odpowiednią korektę do związku określającego zależność przesunięcia ku czerwieni światła galaktyk od ich odległości, a następnie porównać tak wyznaczone wartości z wynikami obserwacji. Okazuje się, że to działa[38].

Odtwarzając kosmiczną ekspansję wstecz w czasie, możemy wyznaczyć wielkość, którą powszechnie nazywa się „wiekiem Wszechświata". To określenie odnosi się do czasu, jaki upłynął od chwili, gdy Wszechświat był o wiele gorętszy, gęstszy i bardziej jednorodny niż obecnie, czyli, mówiąc w uproszczeniu, chodzi o czas, który upłynął od Wielkiego Wybuchu. W najwcześniejszych chwilach tuż po Wielkim Wybuchu gwiazdy i galaktyki nie mogły się jeszcze tworzyć, ale potrafimy przedstawić oszacowanie, kiedy takie struktury zaczęły powstawać. Możemy również określić wiek różnych bardzo starych obiektów za pomocą zupełnie innych metod, między innymi wykorzystując datowanie bazujące na pierwiastkach promieniotwórczych i teorię ewolucji gwiazd – mówiliśmy o tym

w rozdziale 2. Okazuje się, że te różnorodne sposoby wyznaczania wieku kosmicznych obiektów dają zgodne wyniki. Krótko mówiąc, Wszechświat jest mniej więcej tak stary jak najstarsze znajdujące się w nim obiekty – i tak powinno być.

*Utrzymująca się poświata*

Utrzymująca się poświata fotonów z chwili, w której pierwotna kula ognia po raz pierwszy ochłodziła się na tyle, że stała się przezroczysta, została odkryta w 1964 roku przez Arno Penziasa i Roberta Wilsona. Fotony ją tworzące uległy radykalnemu przesunięciu ku czerwieni i obecnie w większości znajdują się w zakresie promieniowania mikrofalowego (takiego samego promieniowania elektromagnetycznego jak to, które wykorzystujemy w kuchenkach mikrofalowych). Fotony te tworzą tak zwane kosmiczne mikrofalowe promieniowanie tła, w skrócie CMB, od ang. *cosmic microwave background*. Promieniowanie to jest fotografią wczesnego Wszechświata, którą możemy podziwiać na całym niebie, wykrywając niewidoczne gołym okiem „światło". Teoria Wielkiego Wybuchu nie tylko przewiduje istnienie kosmicznego mikrofalowego promieniowania tła, lecz także określa szczegółowo jego skład – czyli, dokładnie rzecz biorąc, pozwala wyznaczyć jego natężenie w poszczególnych zakresach częstotliwości. Również tym razem obserwacje zgadzają się z przewidywaniami.

*Pozostałości*

Gdy rozpalona kula ognia zawierająca kwarki, antykwarki i gluony powoli się ochładzała, cząstki te zaczęły się ze sobą łączyć, tworząc protony, neutrony i proste jądra atomowe. Model Wielkiego Wybuchu pozwala obliczyć względną obfitość różnych jąder powstających w tym procesie. Okazuje się, że przeważającą większość materii, która wyłoniła się z Wielkiego Wybuchu, stanowiły zwykłe jądra wodoru ($^{1}$H – pojedynczy proton) i helu ($^{4}$He – dwa protony i dwa neutrony). Oprócz tego powstały wówczas niewielkie ilości deuteru ($^{2}$H – jeden proton i jeden neutron, izotop wodoru), trytu ($^{3}$He – dwa protony i jeden neutron, izotop helu) i litu ($^{7}$Li – trzy protony i cztery neutrony). Dzięki wykorzystaniu spektroskopii

uczeni zbadali wszystkie te izotopy występujące w kosmosie i stwierdzili, że w odpowiednich „nieprzetworzonych” obszarach[39] ich obfitość zgadza się z przewidywaniami.

Wszystkie pozostałe rodzaje jąder atomowych powstały w procesach zachodzących w gwiazdach na dużo późniejszym etapie historii kosmosu. Mierzenie ich obfitości i wyjaśnianie uzyskanych wyników stanowi wspaniałą dziedzinę badań, ale jej związek z podstawami jest mniej bezpośredni.

## PRZYSZŁOŚĆ HISTORII KOSMOSU

### *Inflacja*

Jak już nieraz podkreślaliśmy, teoria Wielkiego Wybuchu jest bardzo niezwykła. Zakłada, że na samym początku Wszechświat był w gruncie rzeczy niestabilny, a wypełniająca go materia była bardzo precyzyjnie rozłożona – w szczególności przyjmuje się, że była jednorodna – by uniknąć powstania niestabilności grawitacyjnej.

Jest jeszcze inny osobliwy aspekt, o którym wspomnieliśmy tylko mimochodem, ponieważ jego pełne wyjaśnienie zaburzyłoby porządek naszego wywodu[40]. Chodzi mianowicie o to, że teoria Wielkiego Wybuchu zakłada, iż przestrzeń jest euklidesowa, czyli mówiąc inaczej, „płaska”. Płaskość przestrzeni jest w pełni zgodna z ogólną teorią względności Einsteina, ale nie jest konieczna. Teoria względności bez trudu może również opisywać przestrzeń, która jest zakrzywiona. Musimy znaleźć jakieś wyjaśnienie tłumaczące, dlaczego Natura nie wykorzystuje takiej możliwości.

Alan Guth, jeden z fizyków pracujących ze mną w MIT, przedstawił genialną i bardzo obiecującą ideę, która pozwala elegancko wyjaśnić tę kwestię. Wysunął mianowicie hipotezę, że na samym początku we Wszechświecie nastąpił okres niezwykle szybkiej ekspansji, którą nazwał „inflacją”.

Możemy bez trudu zrozumieć intuicyjnie, w jaki sposób inflacja rozwiązuje opisane tu problemy. Jeśli Wszechświat szybko się powiększał,

to wszelkie niejednorodności rozkładu materii musiały ulec rozrzedzeniu, a krzywizna powinna się spłaszczyć[41].

Czy inflacja faktycznie zaszła? Wydaje mi się, że tak, ale byłoby dobrze, gdybyśmy potrafili bardziej szczegółowo wyjaśnić, jak do niej doszło, i zebrać konkretne dowody potwierdzające poprawność tej koncepcji.

Inflacja *nie jest* procesem, który wynika ze znanych nam obecnie podstawowych praw fizyki. Wymaga czegoś więcej – być może wystarczyłyby dodatkowe siły i pola. Andrei Linde i Paul Steinhardt wysunęli nawet przypuszczenia, o jakie siły i pola może chodzić, ale nie mamy żadnych niezależnych dowodów przemawiających za ich istnieniem. Gdybyśmy dysponowali dobrym modelem inflacji, moglibyśmy sprawdzić jego podstawową ideę w bardziej rygorystyczny sposób i wysnuć nowe wnioski wynikające z tej koncepcji. Niestety, wciąż nie mamy takiego modelu. Wydaje się, że w tym obszarze badań istnieje jeszcze wiele możliwości dokonania ważnych odkryć.

### *Sięgając dalej w przeszłość*

Kosmiczne mikrofalowe promieniowanie tła jest utrzymującą się poświatą Wielkiego Wybuchu, która pozwala nam w bezpośredni sposób badać odległą historię Wszechświata. Jak powiedzieliśmy, składa się ono z fotonów, które były obecne w kosmicznej kuli ognia w chwili, gdy jej temperatura spadła po raz pierwszy na tyle, że stała się przezroczysta. Nastąpiło to około 380 000 lat po Wielkim Wybuchu. Choć niewątpliwie było to bardzo dawno, zważywszy, że Wszechświat liczy 13 800 000 000 lat, to jednak jeszcze wcześniej wydarzyło się wiele fascynujących rzeczy i byłoby cudownie, gdybyśmy mogli się im przyjrzeć.

Zbadanie tych wydarzeń wydaje się bardzo trudne, ale mamy kilka realnych możliwości przeprowadzenia takich obserwacji. Wiemy na przykład, że kosmos powinny wypełniać przynajmniej jeszcze dwie inne poświaty, które powstały w sposób podobny do kosmicznego mikrofalowego promieniowania tła, ale składają się z neutrin i grawitonów[42].

Ponieważ neutrina bardzo słabo oddziałują z innymi rodzajami materii, a oddziaływania grawitonów są jeszcze słabsze, pierwotna kula ognia stała się dla nich przezroczysta dużo wcześniej niż dla fotonów. Oznacza to, że

utrzymujące się poświaty neutrin i grawitonów zawierają informacje z okresu o wiele wcześniejszego niż kosmiczne mikrofalowe promieniowanie tła. Szczególnie grawitony mogłyby nam pozwolić na zbadanie zdarzeń, do których doszło zaledwie ułamek sekundy po Wielkim Wybuchu. Te badania powinny przynieść jeszcze wiele niespodzianek. Zdjęcie poświaty grawitonów mogłoby pokazać, co się działo, gdy temperatura i inne parametry miały ekstremalne wartości, daleko wykraczające poza wszystko, co potrafimy osiągnąć w ziemskich laboratoriach. Tego typu warunki prawdopodobnie nie występują już obecnie w żadnym miejscu we Wszechświecie. W ten sposób moglibyśmy na przykład zobaczyć rozbłysk promieniowania grawitacyjnego wyemitowanego podczas kosmicznej inflacji przez szybko poruszającą się materię.

Trudność z zaobserwowaniem takich bardziej egzotycznych rodzajów poświaty wynika z tej samej cechy, która sprawia, że jest ona tak fascynująca, a mianowicie z tego, że tworzące ją cząstki bardzo słabo oddziałują z innymi rodzajami materii. Aby je w ogóle zobaczyć, będziemy musieli skonstruować zupełnie nowe, niezwykle czułe anteny i teleskopy. Takie urządzenia niemal na pewno nie będą w niczym przypominały anten i teleskopów służących do wykrywania fotonów. Uczeni i inżynierowie mają tu ogromne pole do popisu.

Nie możemy wykluczyć obecności jeszcze innych rodzajów poświaty złożonych z cząstek, których istnienia wciąż nie udało nam się potwierdzić. W końcu podstawową cechą poświaty wypełniającej kosmos jest to, że tworzą ją cząstki, które tak słabo oddziałują z materią, iż Wszechświat jest dla nich przezroczysty.

„Ciemna materia” może być właśnie jedną z takich poświat. Podejrzewam, że tak właśnie jest, i zdanie to podziela wielu moich kolegów. Mówiąc konkretnie, wydaje mi się, że ciemna materia jest poświatą złożoną z aksjonów. Bardziej szczegółowo omówimy tę koncepcję w rozdziale 9 i wtedy też przedstawimy argumenty przemawiające za takim wyjaśnieniem.

*Sam początek*

Ponieważ nasze możliwości prowadzenia badań radykalnie maleją, w miarę jak zbliżamy się do Wielkiego Wybuchu, nie możemy powiedzieć z całkowitym przekonaniem, jak wyglądał „sam początek”. Samo pojęcie początku Wszechświata może być mylące, a nawet pozbawione sensu. Święty Augustyn zanotował w swoich *Wyznaniach* interesujące przemyślenia na ten temat, które moim zdaniem zmierzają we właściwym kierunku. Pewien parafianin spytał Augustyna: „Co robił Bóg, zanim stworzył Wszechświat?”. Augustyn napisał, że w pierwszym odruchu chciał odpowiedzieć: „Przygotowywał piekło dla tych, którzy zadają zbyt wiele pytań”, ale za bardzo cenił swojego rozmówcę, samego siebie i Boga, by zbyć go w ten sposób. Zamiast tego zaczął się poważnie nad tym zastanawiać, modlił się o natchnienie i szukał odpowiedzi we własnym umyśle. To zaowocowało głębokimi przemyśleniami na temat czasu.

Augustyn doszedł do wniosków na temat natury czasu, które są bardzo podobne do tego, co opisaliśmy w rozdziale 2. W zasadzie stwierdził, że czas jest tym, co mierzą zegary – ani niczym więcej, ani mniej. Ta myśl naprowadziła go na lepszą odpowiedź na pytanie postawione przez parafianina. Zanim Bóg stworzył świat, nie było zegarów, a zatem nie było też i czasu. To z kolei oznacza, że określenia „przedtem” i „zanim” nie miały żadnego sensu. Zatem gdy się nad tym dobrze zastanowić, dojdziemy do wniosku, że pytanie „Co się działo, zanim Bóg stworzył Wszechświat?” jest pozbawione sensu.

Istotę odpowiedzi udzielonej przez Augustyna można przetłumaczyć na język współczesnej kosmologii fizycznej. Nic nie poprzedza początku Wszechświata, ponieważ w tym kontekście pojęcie czasu – tego, co mierzą zegary – nie ma sensu.

34 Za „dobre” będziemy tutaj uznawali rozwiązania, które są łatwe do sformułowania, dokładne z matematycznego punktu widzenia i pasują do obserwacji.

35 Postępując w ten sposób, zakładamy, że podstawowe prawa fizyki obowiązują w niezmienionej postaci również wtedy, gdy czas biegnie do tyłu. Jest to w zasadzie zgodne z prawdą, ale nie dokładnie. Dlaczego? To pytanie wiąże się z wielką zagadką, którą zajmiemy się w rozdziale 9.

36 To założenie zostało wyjaśnione w dodatku.

37 William Faulkner, *Requiem dla zakonnicy*, przeł. Wacław Niepokólczycki, Państwowy Instytut Wydawniczy, Warszawa 1980, s. 60 (przyp. tłum.).

38 To znaczy taka metoda pozwala dopasować wyniki obserwacji odległych galaktyk do pozostałych danych i przedstawić jeden spójny obraz.

39 Musimy pamiętać o procesie spalania jądrowego, który zachodzi w gwiazdach, ponieważ w jego wyniku dochodzi do przekształcania jąder atomowych – mówiliśmy już o tym we wcześniejszych rozdziałach.

40 Bardziej szczegółowo został on omówiony w dodatku.

41 Okrągły balon będzie się wydawał bardziej płaski, jeśli nadmuchamy go do rozmiaru Ziemi.

42 Badanie pojedynczych grawitonów wykracza raczej poza możliwości współczesnej techniki, ale zaobserwowanie zbiorczego wpływu wielu takich cząstek wypełniających kosmos wydaje się celem możliwym do realizacji.

# 7

# Powstaje złożoność

Świat fizyczny jest skomplikowany. Mieszczą się w nim między innymi lasy deszczowe, Internet i dzieła zebrane Williama Shakespeare'a. Mimo to z podstawowych zasad fizyki wynika, że wszystko to można uzyskać z kilku zaledwie składników, paru praw i zdumiewająco prostego początku.

Wiąże się z tym trudne pytanie o to, w jaki sposób powstaje złożoność na najbardziej podstawowym poziomie. W tym rozdziale poszukamy na nie odpowiedzi. Na koniec zastanowimy się, jak może wyglądać kosmiczna złożoność w odległej przyszłości i w jaki sposób w głębokiej prostocie może się skrywać pozorna złożoność.

## JAK WSZECHŚWIAT STAŁ SIĘ INTERESUJĄCY

### *Nieustępliwość grawitacji*

> Bo kto ma, temu będzie dane; a kto nie ma, pozbawią go i tego, co ma[43].
>
> Mk 4,25

> Każdemu bowiem, kto ma, będzie dodane, tak że nadmiar mieć będzie. Temu zaś, kto nie ma, zabiorą nawet to, co ma.
>
> Mt 25,29

Te cytaty opisują zasadę, która stała się znana jako „efekt świętego Mateusza", choć Ewangelia według świętego Marka niemal z całą

pewnością powstała wcześniej. Mówiąc potocznie, zasada ta oznacza, że „zamożni stają się jeszcze bogatsi, a ubodzy biednieją”.

Niestabilność grawitacyjna, która odgrywa kluczową rolę w powstawaniu złożoności we Wszechświecie, jest jedną z odmian efektu świętego Mateusza. Gęste obszary kosmosu wywierają silniejsze przyciąganie, co oznacza, że gromadzą więcej materii i stają się jeszcze gęstsze. Obszary o gęstości mniejszej od średniej przegrywają w tej rywalizacji i coraz bardziej pustoszeją. W ten sposób z biegiem czasu kontrast gęstości staje się coraz ostrzejszy. Każdy, nawet niewielki kontrast ulega wzmocnieniu. Właśnie na tym polega niestabilność grawitacyjna.

Aby teoria Wielkiego Wybuchu spełniła swoje zadanie, musimy odrobinę poluzować nasze założenie o całkowicie jednorodnym rozkładzie materii na samym początku. W zupełności wystarczy, jeśli założymy bardzo małe odchylenia od doskonałej jednorodności, ponieważ zostaną one później wzmocnione za sprawą niestabilności grawitacyjnej.

Na szczęście kosmiczne mikrofalowe promieniowanie tła, będące zdjęciem Wszechświata z okresu 380 000 lat po Wielkim Wybuchu, nie jest całkowicie jednorodne. Gdy obserwujemy je w różnych obszarach nieba, jego natężenie zmienia się w zakresie tysięcznych części procenta, co odpowiada kontrastowi gęstości o podobnej wielkości. Wykrycie tak niewielkich niejednorodności było dużym sukcesem fizyków prowadzących obserwacje tego promieniowania. W 2006 roku John Mather i George Smoot otrzymali Nagrodę Nobla za pionierskie badania w tej dziedzinie.

Pod wpływem niestabilności grawitacyjnej te nieznaczne zagęszczenia uległy z biegiem czasu wzmocnieniu. Z obliczeń wynika, że ich wielkość jest właśnie taka, jaka powinna być, by w dostępnym czasie mógł się wykształcić kontrast gęstości umożliwiający powstanie galaktyk, gwiazd i struktur, które obecnie obserwujemy we Wszechświecie.

Dlaczego materia we wczesnym Wszechświecie była tak bardzo – ale jednak nie doskonale – jednorodna? Nie możemy tego stwierdzić z całą pewnością, ale istnieje pewna piękna możliwość, którą chciałbym tu przedstawić. Mogłoby się wydawać, że teoria kosmicznej inflacji sugeruje powstanie doskonałej jednorodności, tak jak to wcześniej wyjaśniliśmy. Gdy jednak spróbujemy osadzić tę teorię w formalizmie fizyki podstawowej z wykorzystaniem pól kwantowych, to odkryjemy, że powyższe stwierdzenie nie jest do końca prawdziwe. Z polami kwantowymi

nieodłącznie wiąże się kwantowa nieoznaczoność. Z tego powodu nie zapewnią one doskonałej jednorodności, choć mogą się bardzo do takiego stanu zbliżyć. Nie jest więc wykluczone, że dobry fizyczny opis inflacji dostarczy nam dowodów na to, iż struktury obserwowane w kosmosie mają swoje źródło w kwantowej nieoznaczoności we wczesnym Wszechświecie.

*Niedokończone dzieło materii*

Jak wyjaśniliśmy podczas omawiania naszej piątej podstawy, zachodzący w Słońcu proces spalania jądrowego miał kluczowe znaczenie dla powstania dynamicznej złożoności na Ziemi. Tak się szczęśliwie składa, że Słońce wciąż ewoluuje. Jeszcze nie osiągnęło stanu równowagi. A jednak teoria Wielkiego Wybuchu zakłada, że na samym początku materia była w stanie równowagi termicznej. Jak to się stało, że materia tworząca Słońce jest w innym stanie?

Aby to wyjaśnić, prześledźmy rozwój wypadków. Kosmiczna kula ognia rozszerzała się i ochładzała. Utrzymanie stanu równowagi termicznej wymaga częstych oddziaływań, ale ognista kula nie była już tak bardzo intensywna i oddziaływania zachodziły w niej coraz wolniej. W końcu równowaga termiczna zaczęła zanikać.

Kosmiczne mikrofalowe promieniowanie tła, a także inne możliwe trwałe poświaty, o których mówiliśmy, są odzwierciedleniem właśnie takiego złamania równowagi. Świadczą o tym, że fotony – lub neutrina, grawitony czy aksjony – zaczęły oddziaływać już tylko bardzo rzadko.

Dla Słońca i pozostałych gwiazd istotne jest to, że proces spalania jądrowego, który zachodził podczas Wielkiego Wybuchu, nie dobiegł do swojego logicznego końca. W rozszerzającym się Wszechświecie wiele protonów nie mogło znaleźć pary, z którą mogłyby się połączyć, i dopiero znacznie później napotkały inne cząstki w Słońcu i pozostałych gwiazdach. Można powiedzieć, że *nadająca się do spalania* mieszanka jąder powstałych w Wielkim Wybuchu stanowi jeszcze jedną trwałą poświatę.

# CZUŁOŚĆ: ROZGAŁĘZIANIE SIĘ RZECZYWISTOŚCI

Gra w kości, kręgle i inne formy rozrywki i sportu byłyby nudne – choć być może opłacalne – gdybyśmy potrafili w sposób całkowicie wiarygodny połączyć dane wejściowe z wyjściowymi. W takim przypadku moglibyśmy raz na zawsze opanować do perfekcji sekwencję ruchów potrzebnych do wyrzucenia siódemki lub zbicia wszystkich kręgli i sprawa byłaby załatwiona. Jednak w rzeczywistości jest to niemożliwe, ponieważ niewielkie różnice w ruchu mięśni, wilgotności dłoni, rozkładzie kurzu na stole lub torze do kręgli, a także wiele innych niezauważalnych zmian mogą wpłynąć na wynik rzutu. Krótko mówiąc, rezultat zależy od wielu czynników, których w zasadzie nie możemy przewidzieć ani sprawować nad nimi kontroli.

Podobnie gdy materia tworzy skupiska za sprawą niestabilności grawitacyjnej, ich dokładna postać w każdym określonym miejscu zależy od początkowego położenia i prędkości wielu pojedynczych cząstek. Obliczenia pokazują, że obłoki gazu różniące się bardzo nieznacznie w stanie początkowym mogą formować całkowicie różne układy gwiazd i planet. Niewielka zmiana początkowego położenia kilku cząstek może zmienić liczbę planet, a nawet liczbę gwiazd.

Potwierdzają to obserwacje. Astronomowie już dawno temu zauważyli, że gwiazdy często tworzą układy podwójne. W ostatnich latach zaczęły się prężnie rozwijać badania planet krążących wokół innych gwiazd – czyli egzoplanet – i astronomowie odkryli ogromną różnorodność ich rozmiarów i sposobu ułożenia wokół macierzystych gwiazd.

*Bardzo* małe zmiany na wczesnym etapie historii Układu Słonecznego mogły zadecydować o tym, że konkretna planetoida uderzyła w Ziemię, powodując zagładę dinozaurów, zamiast przelecieć obok bez wyrządzania żadnej szkody.

Choć zatem ogólny formalizm i przebieg kosmicznej historii bazuje na kilku tylko składnikach, niewielu prawach i zdumiewająco prostych warunkach początkowych, to jednak nie możemy przewidzieć bogatych szczegółów świata w żadnym określonym miejscu. Świat przypomina drzewo, które podlegając prostym zasadom wzrostu, wypuszcza wiele

gałęzi, różnorodnych pod względem szczegółów ich budowy, i stanowi schronienie dla wielu różnych ptaków i owadów.

Nie ma żadnej sprzeczności w stwierdzeniu, że historia, powiedzmy, Szwecji jest bardziej skomplikowana od historii Wszechświata. Prawdę mówiąc, wynika to z opisanych tu podstaw.

## PRZYSZŁOŚĆ KOSMICZNEJ ZŁOŻONOŚCI

### *Śmierć cieplna i jak jej zaradzić*

Wszystko wskazuje na to, że odległa przyszłość Wszechświata wygląda dość kiepsko. Galaktyki będą się od siebie oddalały, w gwiazdach skończy się paliwo jądrowe, kosmiczne mikrofalowe promieniowanie tła ulegnie jeszcze większemu przesunięciu ku czerwieni i wejdzie w zakres fal radiowych, a potem zaniknie. Nawet jeszcze przed pojawieniem się teorii Wielkiego Wybuchu i odkryciem rozszerzania się Wszechświata kosmologów martwiła „śmierć cieplna" Wszechświata, ponieważ wszystko wskazywało na to, że kosmos w sposób nieunikniony zmierza do jakiejś równowagi, a po jej osiągnięciu nie będzie się w nim już działo nic interesującego.

Pierwszą rzeczą, jaką należy powiedzieć na ten temat, jest to, że żaden z tych scenariuszy nie zagraża nam w najbliższej przyszłości. Słońce ma przed sobą jeszcze co najmniej kilka miliardów lat życia, a w naszej Galaktyce wciąż rodzą się nowe gwiazdy i wiele z nich (szczególnie gwiazdy typu M) będzie dostarczało ciepła o wiele dłużej niż Słońce.

Ponieważ mamy jeszcze tak dużo czasu, możemy żywić nadzieję, że pomysłowi inżynierowie wpadną na jakiś wspaniały pomysł. Sfery Dysona zbudowane wokół sztucznych gwiazd w połączeniu z rozwiązaniami technicznymi umożliwiającymi oszczędzanie energii mogłyby podtrzymywać istnienie inteligentnego życia jeszcze długo po tym, jak gwiazdy dobiegną naturalnego kresu życia.

Szczególnie dobrą wiadomością jest to, że możemy sobie wyobrazić umysły, które potrzebują do działania bardzo niewiele energii – a kto wie, może nawet zdołałyby działać w ogóle bez jej dostarczania. Komputery

kwantowe najlepiej funkcjonują w chłodzie i ciemnościach, gdy nie ma niczego, co mogłoby zaburzać ich delikatną strukturę. Odpowiednio złożony kryształ czasowy[44] tego rodzaju mógłby bez końca wykonywać skomplikowany program, podtrzymując istnienie zawartej w nim sztucznej inteligencji.

Na koniec podkreślmy, że powinniśmy pamiętać o tym, iż nasze naukowe rozumienie Wszechświata wciąż jest niepełne i nieustannie ewoluuje. Najlepsze teorie opisujące każdy z podstawowych aspektów rzeczywistości uległy diametralnej zmianie w ciągu ostatnich stu lat. Czy uda się nam znaleźć jakiś sposób umożliwiający dalsze spalanie „martwych" już gwiazd i uwolnienie podstawowego zasobu drzemiącej w nich energii – czyli energii wynikającej z masy ich jąder atomowych, zgodnie ze wzorem $E = mc^2$ – w jakiejś postaci nadającej się do wykorzystania?[45] Może uczeni zdołają wytworzyć coś, co będzie przypominało Wielki Wybuch, i w ten sposób doprowadzą do powstania wszechświata potomnego? A może będziemy umieli wykorzystać „ciemną materię" jako źródło energii?[46] Naprawdę tego nie wiemy i oczywiście zawsze możemy się spodziewać, że dokonamy jakichś innych obiecujących odkryć. Kilka miliardów lat w historii nauki i techniki to bardzo długi okres.

### *Złożoność w prostocie*

> Wszechświat (który inni nazywają Biblioteką) składa się z nieokreślonej, i być może nieskończonej, liczby sześciobocznych galerii, z obszernymi studniami wentylacyjnymi w środku, które ogrodzone są niziutkimi balustradami[47].
>
> Jorge Luis Borges

Opiszmy teraz w szesnastu słowach prosty algorytm umożliwiający wygenerowanie dzieł wszystkich Williama Shakespeare'a, przynajmniej jednego dowodu wielkiego twierdzenia Fermata i artykułu naukowego, za który zostanie przyznana Nagroda Nobla w dziedzinie fizyki w roku 2025. Oto on:

1. Wybierz w sposób przypadkowy dowolny znak ASCII – literę, cyfrę, spację lub znak interpunkcyjny.
2. Zapisz go.
3. Powtórz.

Wynik działania takiego programu będzie zawierał wszystko, co obiecaliśmy, i (dużo) więcej.

W opowiadaniu *Biblioteka Babel* Borges przedstawia podobne przemyślenia w sposób nieco bardziej poetycki. *À propos*, nasz program wypisze również *Bibliotekę Babel*.

Ten szokujący eksperyment myślowy pokazuje, że bardzo prosta – to znaczy dająca się łatwo opisać – struktura może zawierać w sobie ogromną złożoność.

Nasz przykład może być dobrym odzwierciedleniem rzeczywistości. Funkcje falowe występujące w mechanice kwantowej zawierają ogromny ładunek informacji. W przypadku czegoś tak ogromnego jak Wszechświat funkcja falowa bez trudu może pomieścić *Bibliotekę Babel*. Proste zasady pozwalają tworzyć pojemne funkcje falowe, tak samo jak nasz prosty algorytm generuje obszerny wydruk.

Biorąc pod uwagę wszystkie te przemyślenia, możemy dojść do wniosku, że funkcja falowa Wszechświata powstaje za sprawą jakiejś prostej reguły, której nie udało nam się jeszcze odkryć. Jeśli tak jest, to Wszechświat, którego doświadczamy i którego jesteśmy częścią, stanowi ukoronowanie procesu „powstawania złożoności”.

43 Wszystkie cytaty z Pisma Świętego pochodzą z *Biblii Tysiąclecia*, Wydawnictwo Pallottinum, Poznań 2003 (przyp. tłum.).

44 Kryształy czasowe są układami fizycznymi, które w sposób spontaniczny wpadają w stabilną pętlę stanów. Zaproponowałem istnienie takiego obiektu w 2012 roku i od tego czasu uczonym udało się odkryć wiele interesujących przykładów tego typu struktur, zarówno na gruncie teorii, jak i eksperymentalnie.

45 Jak już mówiliśmy, z teorii zunifikowanej wynika, iż protony są niestabilne. Teoria ta przewiduje również istnienie doskonałych „katalizatorów” rozpadu protonu, którymi mogłyby być tak zwane monopole magnetyczne lub kosmiczne struny. Nasze spekulacje wcale nie są więc bezpodstawne.

46 Aksjony można by w zasadzie spalać, ale wytwarzana w ten sposób energia byłaby żałośnie mała w porównaniu z energią Słońca, wydaje się więc, że jest to raczej ostatnia deska ratunku.

47 Jorge Luis Borges, *Biblioteka Babel*, przeł. Andrzej Sobol-Jurczykowski [w:] Jorge Luis Borges, *Fikcje*, Państwowy Instytut Wydawniczy, Warszawa 2019, s. 79 (przyp. tłum.).

# 8

# Zostaje jeszcze bardzo dużo do zobaczenia

> Gdy byłem dzieckiem, mówiłem jak dziecko, czułem jak dziecko, myślałem jak dziecko. Kiedy zaś stałem się mężem, wyzbyłem się tego, co dziecięce. Teraz widzimy jakby w zwierciadle, niejasno; wtedy zaś [zobaczymy] twarzą w twarz. Teraz poznaję po części, wtedy zaś poznam tak, jak i zostałem poznany.
>
> Święty Paweł, Pierwszy List do Koryntian 13, 11–12

Wizjonerzy różnych wyznań od dawna podejrzewali, że świat jest czymś więcej, niż możemy to stwierdzić za pomocą zmysłów.

W przytoczonym cytacie święty Paweł przeciwstawia świat konstruowany przez dziecko, traktujące wszystko dosłownie, niejasnym przeczuciom myślących dorosłych, którzy są przekonani, że istnieje jeszcze dużo do zobaczenia i że podążamy w kierunku wymarzonej, oślepiającej prawdy.

Przedstawiając swoją alegorię jaskini, Platon relacjonuje rozmowę Sokratesa z jego przyjacielem Glaukonem, w której Sokrates opisuje dziwne więzienie. Osadzeni w nim niewolnicy znajdują się w ciemnej jaskini i jedynym obrazem, jaki mają przed oczami, jest teatr cieni rzucanych na ścianę. Błędnie wierzą, że to, co widzą, stanowi całą rzeczywistością. Glaukon zauważa: „Dziwny obraz opisujesz i kajdaniarzy osobliwych”, na co Sokrates odpowiada: „Podobnych do nas”[48].

Natomiast William Blake w *Zaślubinach Nieba i Piekła* wyznaje, że wierzy, iż „gdyby wrota postrzegania oczyszczone zostały, każda rzecz ukazałaby się człowiekowi taką jaką jest, nieskończoną”[49].

Opisując fizyczny świat, nauka tworzy swoisty spis inwentarza wszystkiego, co można zaobserwować. Ten spis zgadza się z tym, co mówią wizjonerzy. Pokazuje, że nasze naturalne zdolności postrzegania świata są bardzo ubogie, jeśli weźmiemy pod uwagę pełną zawartość fizycznej

rzeczywistości. Nauka może nam pomóc w przezwyciężeniu niedoskonałości naszych zmysłów. Wiele udało się już w tym zakresie osiągnąć, ale wiele jeszcze pozostało do zrobienia.

## OTWIERAJĄC DRZWI NASZEGO POSTRZEGANIA

Wiele zwierząt żyje w zupełnie innym wszechświecie zmysłowym niż ludzie. Dzielimy z nimi ten sam świat fizyczny, ale doświadczamy go inaczej, nie tylko na poziomie intelektualnym, ale także na poziomie samego postrzegania.

Psy i wiele innych ssaków zamieszkują wszechświat równoległy, w którym dominującą rolę odgrywają zapachy. Psi nos jest prawdziwym laboratorium chemicznym, które bada docierające tam cząsteczki za pomocą trzystu milionów receptorów – u człowieka liczba ta wynosi zaledwie sześć milionów. Ponadto znacząca część mózgu psa – około 20 procent – zajmuje się przetwarzaniem wyników tej analizy, a w przypadku człowieka jest to jedynie 1 procent.

Nietoperze znajdują drogę nawet bez światła dzięki temu, że emitują niezwykle wysokie dźwięki – ultradźwięki – i analizują powracające do nich, odbite fale (ultra)dźwiękowe. Ludzkie ucho w ogóle nie rejestruje ultradźwięków. Nie możemy wykorzystać słuchu do poruszania się w ciemnościach, ponieważ długość fal dźwiękowych słyszalnych przez człowieka jest po prostu za duża. Ogólnie rzecz biorąc, ludzie dość kiepsko radzą sobie z ustalaniem, skąd dobiegają słyszane dźwięki.

Pająki budują sensoryczne sieci zupełnie innego rodzaju. Pajęczyny są nie tylko pułapkami, lecz także urządzeniami sygnalizacyjnymi, których drgania pozwalają wykryć obecność i położenie złapanej ofiary.

Naszym głównym oknem na świat zewnętrzny jest wzrok. Do takiego wniosku możemy dojść, analizując, ile informacji gromadzimy za pomocą tego zmysłu i jaka część naszego mózgu – od 20 do 50 procent, w zależności od tego, jak to liczymy[50] – zajmuje się przetwarzaniem tych danych. Jednak nawet w tym wypadku odbieramy tylko znikomą część tego, co jest dostępne w świecie zewnętrznym. Ludzki wzrok bada stan pola elektromagnetycznego, ale rejestruje jedynie to promieniowanie, które

wpada do źrenic. Co więcej, ludzkie oko jest czułe wyłącznie na promieniowanie zawierające się w wąskim przedziale długości fal od około 350 do 700 nanometrów (czyli około pół milionowej metra). Ten zakres nazywamy „światłem widzialnym”. W dodatku nawet w tym zakresie długości fal nie badamy całego widma. W ludzkim oku występują trzy różne rodzaje komórek zwanych czopkami, które są mniej więcej dostrojone do odbioru określonych podzakresów długości fali potrzebnych do postrzegania barw[51], a także komórki nazywane pręcikami, które z kolei reagują wtedy, gdy postrzegamy coś kątem oka lub gdy znajdujemy się w słabym oświetleniu. Wiele węży i innych gadów wyczuwa promieniowanie podczerwone. Pszczoły widzą w nadfiolecie, podobnie jak wiele ptaków. Ptaki radzą sobie również lepiej z analizą widmową światła widzialnego. W ich receptorach światłoczułych znajdują się kropelki oleju, które wybiórczo filtrują różne zakresy długości fal. Co zdumiewające, najlepszymi specjalistami od spektroskopii w świecie przyrody są przedstawiciele skorupiaków należących do rzędu ustonogów[52] przypominający wyglądem krewetki. W zależności od gatunku ustonogi mają od dwunastu do szesnastu różnych rodzajów receptorów, podczas gdy w ludzkim oku, jak powiedzieliśmy, występują ich tylko cztery rodzaje. Zwierzęta te postrzegają światło z zakresu sięgającego daleko w obszar podczerwieni i nadfioletu, a ponadto są czułe na polaryzację światła (której ludzie zupełnie nie zauważają).

Nasi przodkowie również żyli w zupełnie innym wszechświecie zmysłowym. Obecnie trudno jest nam sobie wyobrazić świat bez okularów, luster, szkieł powiększających (i ich bardziej zaawansowanych odmian, czyli mikroskopów i teleskopów), sztucznego oświetlenia i latarek, zegarków, czujników dymu, termometrów, barometrów i wielu innych urządzeń, które wzbogacają nasze postrzeganie na wielu płaszczyznach. A przecież właśnie taki świat ludzie zamieszkiwali przez większą część swojej historii.

Dzięki technice już teraz zyskaliśmy nadprzyrodzone moce, a możliwości dalszego rozwoju wydają się nieograniczone. Powszechnie dostępne są miniaturowe i tanie odbiorniki i nadajniki promieniowania elektromagnetycznego, zarówno w zakresie widzialnym, jak i poza nim, podobnie jak czujniki pola magnetycznego, generatory i odbiorniki ultradźwięków, a także urządzenia potrafiące wykonywać różnorodne

analizy chemiczne (tak zwane sztuczne nosy). Okno, przez które postrzegamy świat, otwiera się coraz szerzej i zmiana ta obejmuje wszystkie aspekty naszego życia.

## WYMAGAJĄCE ODKRYCIA

Inne przedsięwzięcia mające na celu poszerzenie możliwości naszego postrzegania wymagają zastosowania nadzwyczajnych środków i wiedzy z różnych dziedzin nauki i techniki. Realizujemy je po to, by znaleźć odpowiedź na wielkie pytania przez obserwowanie Natury w zupełnie nowy sposób. Nowe możliwości postrzegania, które dzięki nim uzyskamy, nie staną się jednak w najbliższym czasie częścią naszej rzeczywistości. Mimo to uczeni nie szczędzą wysiłków, by prowadzić takie żmudne badania, ponieważ są one po prostu interesujące.

W tym miejscu opiszemy krótko dwa wielkie przedsięwzięcia, które w ostatnich latach poszerzyły nasze możliwości oglądu świata. Są to przykłady *zaplanowanych odkryć*, które polegają na tym, że stawiamy Naturze jasno sformułowane pytania i spodziewamy się uzyskać na nie odpowiedzi. W obu przypadkach wyjaśnimy, dlaczego postawiliśmy takie, a nie inne pytanie, co sprawia, że chcemy szukać na nie odpowiedzi, i jak to robimy.

Realizując te projekty, docieramy do granic tego, co potrafimy osiągnąć[53], tylko po to, by poszerzyć horyzonty naszej wiedzy. Badania te stanowią sprawdzian podstaw naszego rozumienia świata.

## CZĄSTKA HIGGSA

### *Dlaczego prowadzimy obserwacje i czego szukamy*

Wyobraźmy sobie planetę lub księżyc skuty lodem, pod którym rozciąga się ogromny ocean – zupełnie tak jak na Europie, księżycu Jowisza. Wyobraźmy sobie dalej, że w tym oceanie wykształcił się na drodze ewolucji gatunek inteligentnych ryb, tak mądrych, że zajęły się badaniem

fizyki ruchu. Ponieważ sposób poruszania się ich ciał w wodzie jest dość skomplikowany, wynikiem prac jest zbiór wielu interesujących obserwacji i praktycznych zasad, które nie tworzą jednak spójnego systemu. Właśnie tak się rozwijała nauka w rybim świecie aż do dnia, w którym pewna genialna ryba, nazwijmy ją Rybim Newtonem, wpadła na zaskakujący nowy pomysł. Rybi Newton przedstawił zupełnie nowe, o wiele prostsze prawa opisujące ruch, które stały się znane jako zasady dynamiki Newtona. Są one mniej skomplikowane niż stare reguły, ale nie opisują sposobu, w jaki ciała faktycznie się poruszają (czyli ruchu ciał w wodzie). Rybi Newton stwierdził jednak, że te nowe, prostsze prawa pozwalają odtworzyć obserwowany ruch, jeśli przyjmiemy założenie o istnieniu pewnego ośrodka, który wypełnia przestrzeń. Ten hipotetyczny ośrodek – substancja, którą my nazywamy wodą – wpływa na zachowanie ciał. Idea zaproponowana przez Rybiego Newtona pozwala pogodzić skomplikowane zachowanie obserwowane w rzeczywistości z prostotą na bardziej podstawowym poziomie.

> O, Miłości! Gdybyś mogła wraz ze mną i Losem
> Ten żałosny Porządek Rzeczy z jego chaosem
> Chwycić i rozbić na kawałki, by jak bluźnierca
> Ukształtować go na nowo ku uciesze serca!
>
> Omar Chajjam

Gdy obserwowany porządek rzeczy nas rozczarowuje lub nie zgadza się z naszymi odczuciami, możemy, tak jak Rybi Newton, wyobrazić sobie lepszy świat, a potem podjąć próbę skonstruowania w nim naszej rzeczywistości. Właśnie taka strategia pozwoliła nam zrozumieć oddziaływanie słabe.

Ośrodkiem, który komplikuje oddziaływanie słabe, jest tak zwany kondensat Higgsa – jego nazwa pochodzi od nazwiska szkockiego fizyka Petera Higgsa, który wniósł istotny wkład w rozwój tej teorii[54]. Po raz pierwszy wysunięto hipotezę istnienia takiego ośrodka na gruncie czystej teorii, wyłącznie po to, by uzyskać piękniejsze równania – tak samo postąpił Rybi Newton.

Po usunięciu kondensatu Higgsa możemy skonstruować teorię oddziaływania słabego, która pod wieloma względami przypomina teorie opisujące oddziaływania silne i elektromagnetyczne. W takim hipotetycznym świecie oddziaływanie słabe przenosi się za pośrednictwem cząstek przypominających gluony (a także fotony) – zwanych wuonami i zetonami – które zmieniają dwa nowe rodzaje ładunków i reagują na ich obecność. Te nowe rodzaje ładunków – nazwijmy je słabym ładunkiem *A* i słabym ładunkiem *B* – są podobne do trzech ładunków kolorowych z chromodynamiki kwantowej i jednego ładunku elektrycznego z elektrodynamiki kwantowej. Oddziaływanie słabe – i tylko ono – może przekształcić jednostkę ładunku typu *A* w ładunek typu *B* i odwrotnie. Ponieważ cząstki określa się na podstawie ich własności, takie zmiany ładunku słabego powodują przekształcenie cząstki jednego rodzaju w drugi. Właśnie tak możemy wyjaśnić na najgłębszym poziomie naturę oddziaływania słabego, które zmienia cząstki.

Powodem, dla którego musimy wprowadzić kondensat Higgsa, jest fakt, że w rzeczywistym świecie wuony i zetony, w przeciwieństwie do gluonów i fotonów, mają niezerową masę. Aby móc zastosować piękne równania, musimy wprowadzić ośrodek, który spowolni te cząstki.

Taka teoria oddziaływania słabego, zakładająca istnienie nowego ośrodka, zyskała ostateczną postać w latach sześćdziesiątych XX wieku. W latach siedemdziesiątych zaczęły się pojawiać dowody eksperymentalne przemawiające za poprawnością tej hipotezy, które ostatecznie przesądziły o jej akceptacji. Wciąż jednak jedno pytanie pozostawało bez odpowiedzi: z czego jest zbudowany ten niezwykle ważny, wszechobecny ośrodek nazywamy kondensatem Higgsa?

Uczeni wysuwali wiele hipotez na ten temat. Niektórzy uważali, że składa się on z kilku różnych cząstek, i przewidywali istnienie nowych sił, a nawet dodatkowych wymiarów przestrzennych. Jednak najprostszym, najbardziej zachowawczym rozwiązaniem było przyjęcie, że ośrodek ten zawiera tylko jedną nową cząstkę – cząstkę Higgsa. Fizycy uznali, że koniecznie należy sprawdzić, czy Natura wybrała właśnie taką najprostszą możliwość.

*Jak to wykrywamy*

Jeśli kondensat Higgsa zawiera tylko jeden składnik, to możemy wiele na jego temat powiedzieć. Mówiąc w uproszczeniu, jeśli cząstka Higgsa jest kawałkiem tego kondensatu, to jedyną niewiadomą pozostaje wielkość owego kawałka. Możemy przewidzieć wszystkie własności i zachowanie tej cząstki, jeśli tylko poznamy jej masę. Dzięki tak szczegółowemu opisowi fizycy doświadczalni mogli się dobrze przygotować do polowania na cząstkę Higgsa, ponieważ mieli dość jasne wyobrażenie o tym, czego szukają, i wiedzieli, jak można rozpoznać nową cząstkę, jeśli się pojawi.

Aby „odkryć cząstkę Higgsa", należy zrobić dwie rzeczy: trzeba je wytworzyć (przynajmniej kilka) i zdobyć dowód ich krótkiego istnienia. Każdy z tych kroków stanowi duże wyzwanie. Jeśli chcemy wyprodukować ciężkie cząstki elementarne, musimy zgromadzić dużą ilość energii w bardzo małej objętości. Taki efekt można uzyskać w akceleratorach osiągających dużą energię, w których wiązki szybko poruszających się protonów (lub innych cząstek[55]) zderzają się z materią tarczy lub innymi wiązkami. Przed rokiem 2012 w poszukiwaniach cząstki Higgsa wykorzystywano wiązki o coraz wyższej energii, ale wszystkie te wysiłki spełzły na niczym. Obecnie, patrząc z perspektywy czasu, wiemy, że wynikało to z tego, iż w tych doświadczeniach fizycy nie osiągnęli wystarczająco dużej energii. Udało się to dopiero w Wielkim Zderzaczu Hadronów, w skrócie LHC, od ang. *Large Hadron Collider*.

Wielki Zderzacz Hadronów mieści się w podziemnym tunelu w kształcie okręgu o obwodzie około 27 kilometrów, który wydrążono pod wiejskimi terenami rozciągającymi się po obu stronach granicy francusko-szwajcarskiej. Gdy akcelerator jest włączony, dwie cienkie wiązki protonów obiegają tunel w przeciwnych kierunkach, krążąc w rurze znajdującej się w środku tunelu. Protony w wiązce poruszają się z szybkością bliską prędkości światła – tak szybko, że wykonują 11 000 okrążeń na sekundę.

Drogi obu wiązek przecinają się w czterech punktach. Dochodzi w nich do zderzenia tylko niewielkiego ułamka wszystkich protonów, ale i tak oznacza to niemal miliard zderzeń na sekundę. Tak duża moc pozwala uzyskać zagęszczenie energii wystarczające do wytworzenia cząstek Higgsa.

Kolejnym wyzwaniem jest ich wykrycie. Punkty przecięcia się wiązek otaczają gigantyczne detektory wypełnione po brzegi skomplikowanymi urządzeniami. Jeden z nich, detektor ATLAS, jest ponaddwukrotnie większy od Partenonu. Detektory rejestrują energie, ładunki i masy cząstek wyłaniających się z miejsca zderzenia, a także trajektorie ich ruchu. Cała ta informacja, w ilości wynoszącej 25 milionów gigabajtów na rok, jest przesyłana do ogólnoświatowej sieci łączącej tysiące superkomputerów.

Gromadzenie tak wielu danych jest konieczne, ponieważ:

• Zdarzenia obserwowane w akceleratorze są skomplikowane. Średnio rzecz biorąc, w każdym pojedynczym zderzeniu powstaje dziesięć lub więcej cząstek.

• Tylko w nielicznych zderzeniach – w mniej niż jednym na miliard – w ogóle pojawiają się cząstki Higgsa.

• Gdy już dochodzi do ich wytworzenia, nie istnieją one zbyt długo. Czas życia cząstki Higgsa wynosi około $10^{-22}$ sekundy, czyli około jednej dziesięciotryliardowej sekundy.

• W tych rzadkich zdarzeniach, w których na ułamek sekundy pojawiają się cząstki Higgsa, powstaje również wiele innych rzeczy.

Mówiąc krótko, jeśli badacze chcą znaleźć cząstkę Higgsa, muszą zarejestrować i naprawdę dobrze wyjaśnić również wszystko inne, co dzieje się w akceleratorze – a *przede wszystkim* ustalić, jak wyglądają charakterystyczne ślady krótkiej obecności tej cząstki. Jeśli tego nie zrobią, może ich zalać natłok fałszywych sygnałów, które mogliby zinterpretować jako dowód pojawienia się cząstki.

Odkrycie cząstki Higgsa ogłoszono 4 lipca 2012 roku. Sygnałem, który potwierdził jej pojawienie się, był nadmiar par fotonów o wysokiej energii. Uczeni przewidywali, że takie pary powinny powstawać w wyniku rozpadu cząstki Higgsa, i zarejestrowanego nadmiaru nie można było wyjaśnić w żaden inny sposób[56]. Później badacze wykryli również kilka innych sygnałów świadczących o pojawieniu się cząstki Higgsa, które wynikają z innych charakterystycznych cech jej rozpadu. Na razie częstość rejestrowania wszystkich tych różnych sygnałów zgadza się przewidywaniami teoretycznymi.

Możliwość „zobaczenia” cząstki Higgsa poszerzyła granice naszej percepcji. Dostrzegliśmy zdarzenia, które zachodzą w Naturze niezwykle rzadko, przez bardzo krótki czas i tylko w odpowiedzi na bardzo silny bodziec. Dla spostrzegawczego ludzkiego umysłu pusta przestrzeń już nigdy nie będzie całkowicie pusta. Rybi Newton i Peter Higgs trafili w samo sedno.

## FALE GRAWITACYJNE

### *Dlaczego prowadzimy obserwacje i czego szukamy*

Przypomnijmy, że John Wheeler, piewca ogólnej teorii względności, podsumował ją w następujący sposób: „Czasoprzestrzeń mówi materii, jak ma się poruszać, a materia instruuje czasoprzestrzeń, jak powinna się zakrzywiać”. Slogan Wheelera jest chwytliwy, ale mylący, a przynajmniej niepełny bez istotnego uzupełnienia: *czasoprzestrzeń również jest pewną formą materii*.

W szczególności bylibyśmy w błędzie, sądząc, że krzywiznę czasoprzestrzeni w zupełności określa coś innego, co nazywamy „materią”. Do zakrzywienia czasoprzestrzeni potrzebna jest energia, a energia powoduje zakrzywienie czasoprzestrzeni. Z tego wynika, że krzywizna bierze udział w tworzeniu samej siebie. Mówiąc krótko, czasoprzestrzeń żyje własnym życiem.

Już raz słyszeliśmy coś podobnego. Największym osiągnięciem wprowadzonego przez Faradaya pojęcia pola, a zwłaszcza równań Maxwella, które opisują to pojęcie na gruncie matematyki, było odkrycie fal elektromagnetycznych. W przypadku takich fal pole elektromagnetyczne zaczyna żyć własnym życiem. Zmienne pola elektryczne wytwarzają zmienne pola magnetyczne, które z kolei wytwarzają zmienne pola elektryczne i tak dalej bez końca. Samopodtrzymujące się zaburzenie pól przemieszcza się w przestrzeni. Jeśli takie zaburzenie powtarza się w odległości mieszczącej się w pewnym określonym zakresie, to widzimy je w postaci światła. Dowiedzieliśmy się również, jak możemy „zobaczyć” fale o innej długości za pomocą specjalnie zaprojektowanych w tym celu

detektorów, takich jak odbiorniki fal radiowych czy anteny paraboliczne do wykrywania mikrofal.

W podobny sposób opisana przez Einsteina krzywizna pola, które odpowiada grawitacji, również umożliwia powstawanie samopodtrzymujących się zaburzeń. Nazywamy je falami grawitacyjnymi. W przypadku tych fal zakrzywienie czasoprzestrzeni w jednym kierunku prowadzi do powstania zakrzywienia w innych kierunkach.

Równania fal grawitacyjnych są bardzo podobne do równań opisujących fale elektromagnetyczne – oczywiście jeśli przyjmiemy odmienną interpretację poszczególnych symboli[57]. Zupełnie inne jest natomiast źródło, które może wytwarzać takie fale: w przypadku fal elektromagnetycznych są to poruszające się ładunki elektryczne, a w przypadku fal grawitacyjnych – poruszająca się masa.

Mimo ich podobieństwa *jakościowego* istnieją duże różnice *ilościowe* między falami elektromagnetycznymi i grawitacyjnymi. Przyczyną tej różnicy jest fakt wynikający z ogólnej teorii względności, a mianowicie to, że czasoprzestrzeń jest niezwykle sztywna. Nawet bardzo szybki ruch dużej masy może najwyżej spowodować powstanie maleńkich zmarszczek w czasoprzestrzeni. To jest jednocześnie dobra i zła wiadomość.

Dobra, ponieważ oznacza, że jeśli już wykryjemy fale grawitacyjne, to muszą one wynikać z bardzo gwałtownych, najciekawszych zdarzeń, jakie zachodzą we Wszechświecie, podczas których gigantyczne obiekty zaczynają się poruszać w szalonym tempie. Dzięki falom grawitacyjnym zyskaliśmy nową metodę obserwowania Wszechświata, która szczególnie się nadaje do wykrywania takich zdarzeń.

Detektor LIGO (od ang. *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*, obserwatorium fal grawitacyjnych wykorzystujące interferometrię laserową) został zaprojektowany specjalnie w celu wykrywania takich spektakularnych zdarzeń, do których dochodzi w kilku konkretnych przypadkach. Chodzi między innymi o sytuację, gdy dwie czarne dziury, gwiazdy neutronowe lub czarna dziura i gwiazda neutronowa, które krążyły wokół siebie w układzie podwójnym, zaczynają szybko opadać na siebie po spirali, by w końcu połączyć się w jeden obiekt. W takich układach podwójnych dochodzi do utraty energii na skutek wytwarzania fal grawitacyjnych, co powoduje stopniowe zmniejszanie się orbit obu obiektów. Te zmiany zachodzą bardzo powoli niemal do samego

końca, ale w ostatnich kilku chwilach oba ciała zaczynają się poruszać naprawdę szybko. Właśnie wtedy następuje możliwy do wykrycia rozbłysk promieniowania.

Zła wiadomość jest natomiast taka, że wykrycie fal grawitacyjnych jest bardzo trudne.

### *Jak je wykrywamy*

Podstawowa koncepcja, która ostatecznie przerodziła się w detektor LIGO, została opisana w artykule naukowym Rainera Weissa opublikowanym już w 1967 roku. Aby jednak dało się osiągnąć czułość wystarczającą do wykrycia fal grawitacyjnych, konieczne było zastosowanie wielu najnowszych osiągnięć techniki. W efekcie po raz pierwszy fale grawitacyjne udało się wykryć dopiero niemal pięćdziesiąt lat później. Rainer Weiss, Kip Thorne i Barry Barish otrzymali w 2017 roku Nagrodę Nobla za prace nad budową detektora LIGO.

Aby zrozumieć, w jaki sposób LIGO wykrywa fale grawitacyjne, wyobraźmy sobie trzy ciała umieszczone w punktach tworzących wierzchołki olbrzymiej (hipotetycznej) litery L. Dla uproszczenia przyjmijmy, że ciała te unoszą się swobodnie w przestrzeni. Podczas przejścia fali grawitacyjnej dochodzi do odkształcenia samej przestrzeni, w wyniku czego odległości między naszymi trzema ciałami muszą ulec na chwilę zmianie. Jeśli zdołamy w jakiś sposób porównać długości ramion naszej litery L, to możemy wykryć taki efekt. Dzięki temu uzyskamy sygnał przejścia fali grawitacyjnej.

Jeżeli jednak przeprowadzimy przybliżone obliczenia, to otrzymamy oszacowanie spodziewanego efektu, które wcale nie wygląda zachęcająco. Okazuje się, że względna zmiana długości wynosi $10^{-21}$, czyli jest to efekt rzędu jednej dziesięciotrylionowej procent. Większość fizyków uznała, że tak niewielka różnica jest niemożliwa do wykrycia. Jednak Rainer Weiss wraz z kolegami postanowił zastosować nowe pomysły i sztuczki. Uczeni ci wpadli na pomysł, by w roli wspomnianych ciał próbnych wykorzystać lustra. Rozstawili zwierciadła daleko od siebie[58] i odbijali promienie laserowe tam i z powrotem wzdłuż obu ramion. Wielokrotne przesyłanie promienia światła pozwala uzyskać efekt, który jest w gruncie rzeczy równoważny wydłużeniu obu ramion. Dzięki zastosowaniu wypróbowanej

techniki – interferometrii – możemy porównywać odległości pokonywane przez światło z dokładnością do ułamka długości fali. Jeśli uświadomimy sobie, jak mała jest długość fali światła w porównaniu z powiększoną długością ramion, możemy mieć nadzieję, że jednak uda nam się uzyskać potrzebny stosunek obu wielkości, czyli $10^{-21}$.

Wykorzystując takie przemyślne rozwiązania, można skonstruować niezwykle czuły detektor do wykrywania względnego ruchu zwierciadeł. Kolejne wyzwanie polega na odróżnieniu ruchu wynikającego z przejścia fal grawitacyjnych od zmian odległości zachodzących pod wpływem wszystkich innych czynników, które mogą powodować nieznaczny nawet ruch zwierciadeł.

Oczywiście wymaga to uwzględnienia wielu różnych czynników. W dokumentacji technicznej i artykułach naukowych poprzedzających realizację projektu członkowie zespołu detektora LIGO bardzo szczegółowo i dogłębnie opisali wszystkie środki zaradcze i procedury sprawdzające, jakie musieli przedsięwziąć. W tym miejscu omówimy tylko jeden z najbardziej istotnych problemów, jakim są nieuniknione drgania gruntu pod detektorem mogące wynikać z wielu przyczyn, od słabych trzęsień ziemi po niesprzyjającą pogodę i przejeżdżające ciężarówki. Aby wyeliminować wpływ takich drgań, lustra zostały zawieszone na poczwórnych wahadłach, które dodatkowo są stabilizowane przez układ aktywnego sprzężenia zwrotnego. Ta konstrukcja jest prawdziwym cudem techniki, który wynosi sztukę amortyzowania wstrząsów i niwelowania szumów na zupełnie nowy poziom.

Uczeni przewidzieli także, że drgania powstające w wyniku przejścia fal grawitacyjnych powinny się zachowywać w pewien charakterystyczny sposób, co pomogło w ich poprawnym wykryciu. Najbardziej podstawową cechą takich drgań jest to, że muszą się pojawić w dwóch niezależnych detektorach działających w różnych miejscach i mieć taki sam wzór ruchu, ale przesunięty w czasie, tak by mógł odpowiadać zaburzeniu przemieszczającemu się z prędkością światła. Jeśli chodzi o szczegóły spodziewanego wzoru zaburzeń, to teoria łączenia się czarnych dziur i gwiazd neutronowych pozwala przewidzieć, jak powinny wyglądać te drgania w funkcji czasu, jeśli powstają pod wpływem fal grawitacyjnych wytworzonych w takim zdarzeniu.

Po raz pierwszy fale grawitacyjne udało się wykryć 18 września 2015 roku. Wykryty efekt pasował do przejścia fali grawitacyjnej wyemitowanej w rozbłysku promieniowania podczas łączenia się dwóch czarnych dziur o masach od dwudziestu do trzydziestu razy większych od masy Słońca i znajdujących się w odległości koło 1,3 miliarda lat świetlnych od nas.

Od tego czasu wykryto około pięćdziesięciu kolejnych zdarzeń tego typu. Szczególnie interesującą falę zarejestrowano 17 sierpnia 2017 roku. W tym przypadku zaobserwowany efekt pasował do fali powstałej podczas łączenia się dwóch gwiazd neutronowych. Informację o zaobserwowaniu tej fali natychmiast przekazano astronomom, którzy wykryli promieniowanie dobiegające ze wskazanego obszaru w kilku zakresach widma elektromagnetycznego – między innymi stwierdzili pojawienie się rozbłysku promieniowania gamma i utrzymującej się poświaty w świetle widzialnym. Wydarzenie to było pierwszym przypadkiem prowadzenia „wielokanałowych" obserwacji astronomicznych, dzięki którym nasze postrzeganie niezwykłych, odległych zdarzeń na pewno stanie się jeszcze pełniejsze.

## PRZYSZŁOŚĆ POSTRZEGANIA

### *Zmysły rozproszone*

> słuchaj: jest śliczny, piekielnie dobry wszechświat tuż obok; chodź z nami[59].
>
> e.e. cummings

Iluzja „fantomowej dłoni" jest dziwnym uczuciem. Aby go doświadczyć, należy schować prawą dłoń za przesłoną i patrzeć na sztuczną gumową dłoń, która znajduje się za nią. Potem trzeba kogoś poprosić, żeby w przypadkowej kolejności, ale w sposób synchroniczny, poklepywał zarówno niewidoczną prawdziwą dłoń, jak i wystającą z przesłony sztuczną rękę. Po krótkiej chwili – zazwyczaj po upływie niecałej minuty – zaczynamy mieć wrażenie, że uczucie poklepywania dochodzi z gumowej, a nie z prawdziwej dłoni. Diane Rogers-Ramachandran i Vilayanur

Ramachandran, którzy prowadzili pionierskie badania takiej i innych iluzji, zwrócili uwagę naukowców na głębokie znaczenie tego typu efektów:

> Wszyscy idziemy przez życie, przyjmując różne założenia odnośnie do naszego istnienia. […] Wydaje się, że poza wszelką wątpliwością pozostaje jedynie fakt, iż jesteśmy zakotwiczeni w naszym ciele. A jednak wystarczy kilka sekund odpowiedniej stymulacji, by nawet te aksjomatyczne podstawy naszego istnienia przestały na pewien czas obowiązywać.

Kilka lat temu mniej więcej przez godzinę znajdowałem się w dwóch miejscach naraz. Siedziałem w fotelu w moim domu w Cambridge w stanie Massachusetts i jednocześnie uczestniczyłem w konferencji w Göteborgu w Szwecji. Doświadczyłem wówczas swoistej rozszerzonej wersji iluzji fantomowej dłoni, którą odczuwałem całym ciałem. Oglądałem świat i słuchałem dźwięków przez „oczy” i „uszy” robota, którym sterowałem zdalnie za pomocą joysticka. Mogłem nawet „chodzić” i rozmawiać z ludźmi, którzy widzieli moją twarz wyświetlającą się na ekranie stanowiącym część tego zrobotyzowanego alter ego. Wygłosiłem krótki wykład, przechadzając się po scenie i obserwując reakcje publiczności, wziąłem udział w dyskusji panelowej, a nawet udzielałem się towarzysko podczas przerwy na kawę.

Na samym początku, gdy uczyłem się obsługiwać ten system, miałem nieodpartą świadomość sztuczności całej sytuacji. Jednak po upływie mniej więcej pół godziny, gdy sterowanie robotem stało się dla mnie czynnością odruchową i nie wymagało już udziału mojej świadomości, odnosiłem wrażenie, że naprawdę jestem w Göteborgu. Przez cały czas czułem jednak, gdzieś z tyłu głowy, że jestem również w Cambridge i siedzę przed ekranem komputerowym. Moja świadomość się rozszerzyła – robot stał się przedłużeniem mojej osoby.

System, którym się posługiwałem, nie był zbyt zaawansowany. Nikt nie pomyliłby robota ProBeam z ludzkim ciałem, tak jak nikt chyba nie uznałby gumowej dłoni za rękę z krwi i kości. Mimo to dzięki temu systemowi doświadczyłem czegoś niezwykle przekonującego. W przyszłości, gdy z jednej strony będą działały bogato wyposażone

roboty, a z drugiej będziemy mieli do dyspozycji wszechobejmującą wirtualną rzeczywistość, nasze wrażenia zmysłowe będą obejmowały ogromne obszary przestrzeni, ale jednocześnie nadal pozostaną głęboko zakorzenione w naszym umyśle.

### *Postrzeganie kwantowe i samopostrzeganie*

> Sądzę, że mogę bezpiecznie stwierdzić, iż nikt nie rozumie mechaniki kwantowej[60].
>
> Richard Feynman

> Uznaję, że rozumiem dane równanie dopiero wtedy, gdy potrafię przewidzieć własności jego rozwiązań bez rozwiązywania go.
>
> Paul Dirac

Możliwości postrzegania, jakimi obdarzyła nas natura, nie na wiele się zdają w mechanice kwantowej. W świecie kwantowym współistnieje ze sobą wiele możliwych układów i zachowań. Jeśli spojrzymy, zobaczymy tylko jeden z nich, ale nie możemy z góry przewidzieć, który to będzie. Żaden zestaw różnych wrażeń (czyli obserwacji) nie zdoła w pełni opisać stanu układu kwantowego[61].

Koronnym osiągnięciem naturalnej ludzkiej percepcji jest natomiast umiejętność tworzenia modeli świata bazujących na założeniu, że poszczególne obiekty o mniej więcej przewidywalnych własnościach zajmują dość dobrze określone miejsce w trójwymiarowej przestrzeni. Ta bardzo użyteczna informacja pomaga nam w życiu codziennym i zdobywamy ją bez najmniejszego wysiłku. Jednak nasze odkrycia na poziomie podstawowym świadczą o tym, że zakres zjawisk, które można dostrzec, jest o wiele szerszy, a mechanika kwantowa odsłania jeszcze jeden, kolejny poziom.

Na szczęście istnieją sposoby, do tej pory mało wykorzystane, które pozwalają nam dostosować świat kwantowy do ludzkiej percepcji. Jeśli potrafimy obliczyć jakiś interesujący nas stan – na przykład stan kwarków i gluonów w protonie, elektronów i jąder atomowych w cząsteczce czy kubitów w komputerze kwantowym – to możemy również wyznaczyć

rezultat obserwacji tego stanu, powtórzonych dowolną liczbę razy, *tak jak gdybyśmy faktycznie przeprowadzili takie obserwacje*. Mając takie obliczenia, możemy przedstawić ich wyniki w postaci „normalnych” zjawisk, takich jakie postrzegamy, wyświetlając je jednocześnie na wielu monitorach. W ten sposób fizycy, chemicy i pasjonaci nauki mogliby się zanurzyć w świecie kwantowym i być może w końcu go zrozumieć.

Poznaj samego siebie.

*Inskrypcja na frontonie świątyni Apollina w Delfach*

To dziwne, ale z podobnym procesem mamy do czynienia w stosunku do postrzegania samego siebie. W naszym mózgu dzieje się równocześnie wiele rzeczy, ale naturalna świadomość pozwala nam się zajmować tylko jedną z nich naraz i wiele działań zachodzących w mózgu jest przed nami całkowicie ukrytych. Możemy przełączyć uwagę z jednego działającego obszaru na drugi, ale jeśli próbujemy skupić się na więcej niż jednej rzeczy równocześnie, to przychodzi nam to z dużą trudnością i wydaje się nienaturalne[62]. Gdy posiądziemy lepsze możliwości monitorowania i interpretowania stanów mózgu, będziemy mogli pokazywać nasze wewnętrzne ja naszemu świadomemu ja za pośrednictwem układu wzroku, wyświetlając informacje na monitorach i omijając w ten sposób filtr naturalnej świadomości. Dzięki temu więcej się o sobie dowiemy i mniej pozostanie przed nami ukryte. Ludzie zrozumieją dogłębnie samych siebie, a może i innych, widząc się w zupełnie nowym świetle.

48 Platon, *Państwo*, przeł. Władysław Witwicki, księga VII, Wydawnictwo „Antyk”, Kęty 2003, s. 220 (przyp. tłum.).

49 William Blake, *Zaślubiny Nieba i Piekła* [w:] William Blake, *Milton: poemat w dwu księgach; Zaślubiny Nieba i Piekła*, przeł. Wiesław Juszczak, Towarzystwo Autorów i Wydawców Prac Naukowych „Universitas”, Kraków 2001, s. 137 (przyp. tłum.).

50 Trudno to jednoznacznie stwierdzić, ponieważ w niektórych obszarach mózgu następuje przetwarzanie połączonej informacji zebranej przez kilka różnych zmysłów.

51 Istnieje kilka rodzajów upośledzenia postrzegania barw, tak zwanego daltonizmu, które wcale nie zdarzają się tak rzadko, jak by się wydawało. Około 95 procent ludzi widzi barwy w podobny sposób, bazujący na wykorzystaniu trzech rodzajów czopków, które różnią się tylko nieznacznie u poszczególnych osób. Na podstawie badań genetycznych

możemy przypuszczać, że znacząca część ludzi, szczególnie matki i siostry mężczyzn dotkniętych najczęściej występującymi formami daltonizmu, ma nie trzy, ale cztery rodzaje czopków. Osoby te, nazywane „tetrachromatami”, są obdarzone nadnaturalnym postrzeganiem barw. Jednak, o ile mi wiadomo, liczba bezpośrednich dowodów potwierdzających takie rozszerzone zdolności widzenia kolorów jest zaskakująco mała.

52 Jest to różnorodna grupa spokrewnionych gatunków; biolodzy odkryli ich już ponad 450.

53 A raczej tego, co *sądzimy*, że potrafimy osiągnąć.

54 Podobnie jak kilku innych uczonych. To jednak nie jest miejsce na omawianie skomplikowanej historii powstania tej koncepcji, a ja nie jestem historykiem nauki, by się tego podjąć.

55 W akceleratorach cząstek w różnego rodzaju doświadczeniach wykorzystuje się również wiązki elektronów, antyelektronów, antyprotonów, fotonów, przeróżnych jąder atomowych, a nawet neutrin i antyneutrin. Odkrycia cząstki Higgsa dokonano dzięki zderzeniu ze sobą dwóch wiązek rozpędzonych protonów.

56 W wielu innych procesach również tworzą się pary fotonów, ale w przypadku rozpadu cząstki Higgsa takie pary muszą mieć charakterystyczną wartość energii i pędu. Porównując częstość pojawiania się par o takiej określonej wartości energii i pędu z częstością powstawania wszystkich innych par fotonów – w żargonie fizyków nazywamy je parami rezonansowymi i nierezonansowymi – możemy ustalić, ile wynosi ów „nadmiar”.

57 Jedną ze wspólnych cech jest to, że fale grawitacyjne również przemieszczają się z prędkością światła.

58 Ostatecznie odległość ta wyniosła kilka kilometrów.

59 e.e. cummings, *Litość to ruchliwe monstrum*, przeł. Stanisław Barańczak [w:] *Wybór wierszy*, PIW, Warszawa 1985 (przyp. tłum.).

60 Richard Feynman, *Charakter praw fizycznych*, przeł. Piotr Amsterdamski, Prószyński i S-ka, Warszawa 2000, s. 137 (przyp. tłum.).

61 Więcej informacji na ten temat można znaleźć w ostatnim rozdziale.

62 Zdaję sobie sprawę, że te dwa zdania są nieporadnym opisem bardzo złożonej rzeczywistości. Ich wymowa jest jednak jasna i wystarczają, by zwrócić uwagę na istotę rzeczy.

# 9

# Pozostałe tajemnice

> Tajemniczość jest najpiękniejszym naszym przeżyciem. Stanowi ona owo zasadnicze uczucie, które towarzyszy prawdziwej sztuce i wiedzy od samego ich zarania. Kto nie zna tego uczucia i nie umie się już dziwić, nie potrafi zdobyć się na zdumienie, tego muszę uznać za martwego, oko jego zgasło bowiem[63].
>
> Albert Einstein

Choć wiemy już *bardzo dużo* na temat tego, jak działa świat, to wciąż nie udało nam się rozwiązać kilku wielkich tajemnic. Z tymi trzema ważnymi pytaniami zmierzyliśmy się już wcześniej:

• Co wywołało Wielki Wybuch? I czy może on wydarzyć się ponownie?
• Czy w bezładnym, jak się wydaje, skupisku cząstek elementarnych i sił kryją się jakieś sensowne prawidłowości?
• Jak właściwie umysł wyłania się z materii? (I czy w ogóle).

W tym rozdziale skupimy się na dwóch wielkich zagadkach, które są trochę bardziej konkretne. Pojawiają się przy okazji najnowszych badań, których celem jest pogłębienie naszego fundamentalnego rozumienia świata fizycznego. Pierwsza tajemnica jest związana z pewną niezwykłą cechą praw podstawowych. Chodzi o to, że prawa te działają niemal tak samo, choć nie dokładnie, gdy odwrócimy kierunek upływu czasu. Druga tajemnica ujawniła się przy okazji dokonania pewnego niezrozumiałego odkrycia. Astronomowie stwierdzili mianowicie, że w kosmosie w wielu różnych miejscach można dostrzec wpływ oddziaływania grawitacyjnego, które nie ma żadnego widocznego źródła. Wydaje się, że wyniki tych obserwacji przemawiają za istnieniem „ciemnej strony Wszechświata”

składającej się z dwóch nowych postaci materii, „ciemnej materii” i „ciemnej energii”, które jakoś do tej pory pozostawały niezauważone, mimo iż stanowią większą część masy Wszechświata.

Na szczęście pojawiła się pewna obiecująca idea, które może nam pomóc w rozwiązaniu tych zagadek. Problem odwrócenia biegu czasu skłonił wielu fizyków do wysunięcia hipotezy istnienia nowego rodzaju cząstek, które nazywano *aksjonami*. Z kolei trwała poświata aksjonów pozostałych po Wielkim Wybuchu mogłaby mieć odpowiednie właściwości, by tworzyć ciemną materię. Gwałtowny wzrost liczby prac związanych z tą ideą skłonił setki uczonych na całym świecie do podjęcia energicznych prób odkrycia owej cząstki.

## ODWRÓCENIE CZASU (T)

### *Zwierciadlany obraz czasu*

Niewiele aspektów naszej rzeczywistości jest równie oczywistych jak asymetria między przeszłością i przyszłością. Pamiętamy przeszłość, ale w odniesieniu do przyszłości możemy jedynie zgadywać, co się wydarzy. Jeśli odtworzymy jakiś film – powiedzmy, *Światła wielkiego miasta* Charliego Chaplina – od końca, to jego akcja w niczym nie będzie przypominała ciągu zdarzeń, które mogłyby się pojawić w rzeczywistości. Nigdy nie pomylilibyśmy takiej projekcji z filmem odtwarzanym poprawnie.

Mimo to od samego początku współczesnej nauki, od newtonowskiej mechaniki klasycznej po teorie rozwijane jeszcze całkiem niedawno, wszystkie podstawowe prawa charakteryzowały się tym, że można je było stosować wstecz w czasie. Innymi słowy, prawa potrzebne do określenia stanu układu w przeszłości na podstawie jego stanu obecnego są takie same jak prawa pozwalające przewidzieć jego przyszły stan. Jeśli na przykład wyobrazimy sobie, że nakręciliśmy film pokazujący ruch planet wokół Słońca zgodny z prawami Newtona, to po odtworzeniu tego filmu od końca zdarzenia widoczne na ekranie również będą zgodne z prawami Newtona.

Ta cecha praw fizycznych jest znana jako symetria względem odwrócenia czasu i oznaczana skrótowo symbolem T.

W miarę rozwoju nauki poszerzał się zakres poznanych praw, ale nieodmiennie obowiązywała w nich symetria odwrócenia czasu. Przejawiają ją na przykład równania elektromagnetyzmu Maxwella i poprawione równania grawitacyjne Einsteina, a także kwantowe wersje tych równań. W dodatku wydawało się, że obowiązywanie tej symetrii potwierdzały wyniki badań podstawowych oddziaływań.

Stoi to w jaskrawej sprzeczności z naszym codziennym doświadczeniem i w konsekwencji pojawiły się dwa problemy związane z prawami podstawowymi. Pierwszym jest konieczność wyjaśnienia, w jaki sposób rzeczywisty Wszechświat określa preferowany kierunek upływu czasu. Rozwiązanie tego problemu przedstawiliśmy w rozdziałach 6 i (szczególnie) 7, w których mówiliśmy o tym, że grawitacja była drogą wyjścia ze stanu równowagi[64]. Drugim jest po prostu pytanie: dlaczego? Dlaczego w naszym podstawowym opisie Natury miałaby występować symetria T, skoro świat, którego doświadczamy, najwyraźniej jej nie przejawia?

*Dlaczego? Pierwsze podejście: najgłębszy poziom*

Niektóre małe dzieci zadręczają swoich rodziców niekończącymi się ciągami pytań „Dlaczego?”. (*Dlaczego* muszę iść spać? Ponieważ ludzie potrzebują odpoczynku. *Dlaczego?* Ponieważ nasze ciało się męczy. *Dlaczego?* Ponieważ gdy przez dłuższy czas posługujemy się mięśniami, przestają dobrze działać. *Dlaczego?* Ponieważ zużywają zjadane przez nas pożywienie i w wyniku tego gromadzą się w nich pewne odpady, które należy usunąć. *Dlaczego?* Ponieważ wszystko się zużywa, co wynika z drugiej zasady termodynamiki. *Dlaczego?* Ponieważ podczas Wielkiego Wybuchu grawitacja nie była w stanie równowagi…). W końcu rodzicom kończą się odpowiedzi[65]. W pewnym momencie docierają do ściany, ich wyjaśnienia bowiem osiągają najgłębszy poziom, na którym odpowiedzi są już tak podstawowe, że nie można ich dalej wyjaśnić – tak po prostu jest.

Mimo iż wydawało się, że symetrię T spełniają ściśle wszystkie podstawowe prawa, to wcale nie było jasne, czy stawianie pytań „Dlaczego?” ma tu w ogóle jakiś sens. Fizycy odnosili wrażenie, że

symetria jest po prostu elegancką, choć trochę osobliwą własnością tych praw, że znajduje się już na najgłębszym poziomie. Większość uczonych była przekonana, że tak właśnie jest.

*Dlaczego? Drugie podejście: uświęcone zasady*

Sytuacja uległa zmianie w 1964 roku, gdy James Cronin i Val Fitch ze współpracownikami odkryli niewielki, trudny do zauważenia efekt w procesie rozpadu mezonów K[66], który łamie symetrię T. Ponieważ okazało się, że symetria T nie jest bezwzględnie przestrzegana, to nie może ona stanowić najgłębszego poziomu. W tym miejscu pojawiło się oczywiste pytanie, które wymagało dalszego wyjaśnienia: dlaczego Natura przestrzega symetrii T bardzo dokładnie, *ale nie bezwzględnie*? Poszukiwania rozwiązania tej zagadki okazały się niezwykle owocne.

W 1973 roku Makoto Kobayashi i Toshihide Maskawa opublikowali artykuł, który stanowił przełom w badaniach teoretycznych tego zagadnienia. Kobayashi i Maskawa wykorzystali w swojej pracy skomplikowany formalizm kwantowej teorii pola i teorie Rdzenia podstawowych sił (które w tamtym okresie nie były jeszcze w pełni ukształtowane). Jak już wspomnieliśmy, formalizm ten jest niesłychanie sztywny – bardzo trudno jest wprowadzić w nim jakieś zmiany, tak by nie zburzyć jego spójności. Nikt nie potrafi zmienić jego struktury bez złamania uświęconych zasad[67] względności, mechaniki kwantowej i lokalności. Można go jednak rozszerzyć. Kobayashi i Maskawa odkryli, że jeśli do znanych wówczas dwóch rodzin kwarków i leptonów dodamy jeszcze trzecią[68], to uzyskamy możliwość wprowadzenia oddziaływania, które nie spełnia symetrii T i którego konsekwencją jest powstanie efektu zaobserwowanego przez Cronina i Fitcha. Gdy zaś istnieją tylko dwie znane rodziny, takiej możliwości nie ma.

Wkrótce po ukazaniu się publikacji Kobayashiego i Maskawy uczeni zaczęli odkrywać w akceleratorach osiągających coraz wyższe energie cząstki należące do tej trzeciej rodziny. Później w wielu doświadczeniach udało się również potwierdzić występowanie oddziaływania, które przewidzieli Kobayashi i Maskawa.

To jeszcze nie koniec tej historii. Oprócz oddziaływania wprowadzonego przez Kobayashiego i Maskawę istnieje jeszcze dokładnie jedna *inna*

możliwość występowania procesu, który może łamać symetrię T, zachowując jednocześnie pełną zgodność ze sztywnym formalizmem teorii Rdzenia i kwantowej teorii pola. Proces ten nie jest jednak potrzebny do wyjaśnienia tego, co zaobserwowali Cronin i Fitch, ani żadnego innego znanego wyniku doświadczenia. Wydaje się, że Natura zupełnie z niego nie korzysta. *Dlaczego?*

### *Dlaczego? Trzecie podejście: ewolucja*

W 1977 roku Roberto Peccei i Helen Quinn przedstawili propozycję odpowiedzi na to trzecie i być może ostatnie pytanie „Dlaczego?", związane z symetrią T. Wysunęli teorię ewolucji, która mogłaby zachodzić po rozszerzeniu Rdzenia. Ich hipoteza zakłada, że siła tego nieszablonowego dodatkowego oddziaływania nie jest zwyczajną pojedynczą liczbą, ale polem kwantowym, które może się zmieniać w przestrzeni i czasie. Udowodnili, że jeśli to nowe pole ma odpowiednie, sensownie proste własności, to działające na nie siły będą się starały sprowadzić jego wartość do zera. Peccei i Quinn niejawnie założyli, że zaproponowane przez nich pole przyjmuje taką preferowaną wartość równą zeru. Z kosmologii Wielkiego Wybuchu wynika jednak, że pole to powinno ewoluować w kierunku tej wartości[69].

W ten sposób uzyskaliśmy w końcu satysfakcjonujące odpowiedzi na nasze pytania: podstawowe prawa zachowują symetrię T w sposób prawie dokładny, ale jednak nie w pełni, i wynika to pośrednio z tego, jak głębsze zasady – względności, mechaniki kwantowej i lokalności – działają na elementarne składniki świata.

Te teoretyczne idee mają bardzo ważne konsekwencje. Za chwilę się nimi zajmiemy, ale najpierw zajrzymy na ciemną stronę.

## CIEMNA STRONA

Ciemna materia i ciemna energia mają podobne cechy, przedstawienie ich obu razem wydaje się więc uzasadnione. W obu przypadkach mamy do czynienia z próbą wyjaśnienia obserwowanego ruchu, który nie ma żadnej

widocznej przyczyny. Gdyby zależało nam na trafności nazwy, nawet kosztem jej atrakcyjności, to powinniśmy raczej mówić o „niewyjaśnionych przyspieszeniach” zamiast o „ciemnej materii” i „ciemnej energii”. We wszystkich tych sytuacjach nadmiarowy ruch cechuje się pewną prawidłowością, która sugeruje, że jego przyczyną jest oddziaływanie grawitacyjne pochodzące z jakichś niewidocznych źródeł. Aby wyjaśnić wszystkie obserwacje, musimy wyróżnić dwa nowe, różne rodzaje takich źródeł. Uczeni nazwali je ciemną materią i ciemną energią. Należy w tym miejscu podkreślić, że ani ciemna materia, ani ciemna energia nie są „ciemne” w tradycyjnym rozumieniu tego słowa. W obu wypadkach mamy do czynienia ze źródłami, które do tej pory pozostają niewidoczne. Uczonym nie udało się wykryć ani emisji, ani absorpcji światła w miejscach, w których te „ciemne” składniki powinny się znajdować.

Ciemna materia mogłaby się składać z cząstek jakiegoś nowego rodzaju, które powstały podczas Wielkiego Wybuchu i jedynie bardzo słabo oddziałują ze zwyczajną materią. Ciemna energia mogłaby natomiast być gęstością samej przestrzeni. Są to najpopularniejsze hipotezy na temat ich istoty, które pozwalają w przekonujący sposób wyjaśnić szeroki zakres różnych obserwacji. Niektórzy uczeni mają jeszcze inne pomysły, ale są one (nawet bardziej) spekulatywne.

W przeszłości astronomowie niejednokrotnie musieli się już zmierzyć z podobnymi problemami związanymi z niewyjaśnionym przyspieszeniem obserwowanych obiektów. Sięgnijmy do historii, by umieścić te najnowsze obserwacje w odpowiednim kontekście.

Przez wiele dziesięcioleci po wprowadzeniu w 1687 roku mechaniki newtonowskiej i prawa powszechnego ciążenia – czyli zestawu zasad, które Newton nazywał swoim „Systemem Świata” – nauka święciła sukces za sukcesem. Astronomowie wykonywali coraz dokładniejsze obserwacje ruchu ciał niebieskich, a teoretycy przedstawiali coraz dokładniejsze i obszerniejsze przewidywania tych wartości wynikające z teorii. Niemal bez żadnego wyjątku wszystkie wyniki obserwacji zgadzały się z przewidywaniami teoretycznymi.

Pojawiły się jednak dwa niepokojące problemy. Dotyczyły ruchu dwóch planet: Urana i Merkurego. Wykryto mianowicie wyraźne rozbieżności między przewidywaniami wynikającymi z teorii Newtona a obserwowanymi położeniami tych planet. Nie były to duże różnice –

o wiele mniejsze od rozmiaru Księżyca na niebie – ale nie mieściły się w zakresie błędu dopuszczalnego przez obserwacje. Trzeba było coś z tym zrobić. Albo w obliczeniach czegoś nie uwzględniono, albo teoria jest błędna.

Gdy niezmiernie udana pod każdym innym względem teoria napotyka jakąś przeszkodę, w pierwszym odruchu zakłada się, że teoria jest poprawna, a jedynie w obliczeniach dla tego konkretnego przypadku nie uwzględniono jakiegoś czynnika. Stosując takie podejście, John Couch Adams i Urbain Le Verrier rozważyli możliwość istnienia jeszcze jednej, nieodkrytej dotąd planety, która swoim przyciąganiem grawitacyjnym zaburza orbitę Urana. Moglibyśmy powiedzieć, że wysunęli hipotezę, iż zaobserwowane rozbieżności wynikają z istnienia bardzo konkretnego rodzaju „ciemnej materii".

Adams i Le Verrier obliczyli, gdzie powinna się znajdować ta nowa planeta i w którym miejscu być widoczna na nocnym niebie. Le Verrier wysłał te przewidywania do Obserwatorium Berlińskiego. Astronomowie skierowali teleskop we wskazane miejsce i ujrzeli nieznane ciało niebieskie. Nowa planeta odkryta w 1846 roku otrzymała nazwę Neptun.

Le Verrier próbował zastosować podobne podejście do wyjaśnienia rozbieżności zaobserwowanych w orbicie Merkurego. Wysunął hipotezę istnienia kolejnej nowej planety, którą nazwał Wulkanem. Ta nowa planeta musiałaby krążyć bardzo blisko Słońca, tak by jej grawitacja mogła wpływać na Merkurego, nie powodując żadnych zauważalnych zmian w ruchu pozostałych planet. W takiej sytuacji nie byłoby nic dziwnego w tym, że Wulkan nie został do tej pory odkryty, ponieważ jasna tarcza Słońca bardzo by to utrudniała.

Astronomowie zabrali się do poszukiwania Wulkana, szczególnie intensywnie podczas zaćmień Słońca. Pojawiło się nawet wiele doniesień o dokonaniu odkrycia. Jednak w żadnym z tych przypadków nie przedstawiono przekonujących dowodów i problem pozostał nierozwiązany. Ostatecznie okazało się, że wyjaśnienie rozbieżności w ruchu Merkurego jest zupełnie inne, niż sądzono. W 1915 roku Albert Einstein przedstawił całkowicie nową teorię grawitacji, czyli ogólną teorię względności. Choć teoria Newtona i ogólna teoria względności bazują na zupełnie innych ideach, w wielu sytuacjach dają podobne wyniki. W ramach Układu Słonecznego zdecydowanie największa różnica (choć

wciąż niewielka) w przewidywaniach obu teorii jest związana z ruchem Merkurego. Jednym z pierwszych wielkich sukcesów teorii Einsteina była możliwość odtworzenia obserwowanego ruchu Merkurego bez powoływania się na istnienie jakiejś nowej planety – Einstein opisał to rozwiązanie już w pierwszym artykule, w którym przedstawił nową teorię. Gdy stało się to jasne, dalsze poszukiwania Wulkana zarzucono.

„Ciemna energia" jest innym czynnikiem modyfikującym prawo grawitacji, który również został wprowadzony przez Einsteina. On sam używał jednak nazwy stała kosmologiczna. Jej wprowadzenie jest możliwe na gruncie ogólnej teorii względności. Jeśli pozostaniemy w modelu pojęciowym tej teorii, to w zasadzie istnieje tylko jeden sposób zmiany prawa grawitacji – zaledwie jeden „parametr swobodny" – którym jest dodanie stałej kosmologicznej. W okresie gdy Einstein formułował swoją teorię, nic nie wskazywało na to, by taka stała kosmologiczna była w ogóle potrzebna, i stosując brzytwę Ockhama, przyjął, że jej wartość wynosi zero. Jednak była gotowa do użycia, gdyby z obserwacji wynikało, że jest niezbędna.

Moglibyśmy podsumować żartobliwie tę historyczną dygresję stwierdzeniem, że ciemna materia jest z Neptuna, a ciemna energia z Merkurego. Pokrzepiający morał, jaki płynie z tej historii, jest taki, że dobre zagadki naukowe mają często bardzo interesujące rozwiązania.

*Ciemna materia*

Współcześnie problem ciemnej materii jest dostrzegalny w całym obszarze Wszechświata. Już w kilku skalach i wielu różnych okolicznościach astronomowie stwierdzili występowanie „nadmiarowego" przyspieszenia. W tym miejscu omówimy tylko dwa rodzaje obserwacji, które pozwoliły odkryć dziesiątki, jeśli nie setki dobrze udokumentowanych przykładów takich rozbieżności.

Pierwsza grupa obserwacji jest związana z badaniem prędkości, z jaką gwiazdy i obłoki gazu w zewnętrznym obszarze galaktyki krążą wokół jej środka. Jedno z praw Keplera, które obecnie wynika zarówno z teorii Newtona, jak i Einsteina, łączy prędkość krążenia obiektu po orbicie z wielkością masy w jej środku. Jeśli zatem zmierzymy obserwowaną prędkość ruchu orbitalnego obiektów w zewnętrznych obszarach galaktyki,

to możemy wyliczyć, jak duża masa musi być rozmieszczona w jej środku. Wykonując takie obliczenia, uczeni stwierdzili, że jeśli chcemy wyjaśnić obserwowane prędkości, to musimy założyć obecność dużej ilości masy w miejscach, z których nie dobiega do nas żadne światło. W zasadzie we wszystkich przypadkach, jakie zbadano, astronomowie doszli do wniosku, że wokół galaktyk musi się rozciągać halo ciemnej (niewidocznej) materii. Można się nawet pokusić o stwierdzenie, że rozświetlona część galaktyki jest tylko swoistą „domieszką" w ogromnym obłoku ciemnej materii. Halo ciemnej materii, gdy zsumuje się jego masę, waży średnio około sześciu razy więcej niż ta widoczna domieszka.

Drugi rodzaj obserwacji polega na wykryciu zakrzywienia światła, czyli efektu znanego jako soczewkowanie grawitacyjne. Astronomowie wielokrotnie zauważyli, że obraz odległych galaktyk ulega dużemu zniekształceniu i obiekty te wyglądają tak, jak gdybyśmy oglądali je przez szklankę z wodą lub butelkę po coca-coli. Dochodzi do tego szczególnie wtedy, gdy dobiegające do nas światło obserwowanej galaktyki musiało po drodze przejść przez obszar kosmosu zawierający jakąś inną gromadę galaktyk. Ogólna teoria względności przewiduje, że grawitacja powinna zakrzywiać światło, zatem występowanie efektu soczewkowania grawitacyjnego nie może nikogo dziwić. Zaskakująca jest jednak siła obserwowanego zniekształcenia. Również w tym wypadku astronomowie ustalili, że masa gromad galaktyk musi być około sześciu razy większa od masy widocznych gwiazd i obłoków gazu, tylko tym bowiem można wyjaśnić obserwowany efekt.

Wyniki tych i innych obserwacji sugerują, że ciemna materia stanowi około 25 procent masy Wszechświata. „Normalna" materia – ta, którą rozumiemy i z której sami jesteśmy zbudowani – stanowi około 4 procent. Reszta to w większości ciemna energia.

### *Ciemna energia*

Zupełnie innego rodzaju obserwacje naprowadziły nas na trop istnienia ciemnej energii. W tym miejscu warto przytoczyć kilka faktów historycznych. Albert Einstein sformułował swoją teorię grawitacji, czyli ogólną teorię względności, w 1915 roku. Niedługo potem, bo w 1917 roku, zmodyfikował jej równania, wprowadzając do nich człon, który nazwał

stałą kosmologiczną. Z fizycznego punktu widzenia dodanie stałej kosmologicznej jest równoważne przypisaniu pustej przestrzeni pewnej niezerowej gęstości. Zatem niezerowa wartość stałej kosmologicznej oznacza, że każda jednostka objętości przestrzeni wnosi jednakowy, niezerowy wkład do całkowitej masy Wszechświata, nawet wtedy, gdy (pozornie) niczego tam ma.

Niezerową stałą kosmologiczną można bez trudu dodać do formalizmu ogólnej teorii względności. Nie wymaga to wprowadzenia żadnych istotnych zmian w podstawowych zasadach teorii. Materia nadal zakrzywia czasoprzestrzeń tak samo jak wcześniej i nic się też nie zmienia w sposobie, w jaki reaguje ona na krzywiznę czasoprzestrzeni. Stała kosmologiczna dopuszcza jedynie możliwość, że sama czasoprzestrzeń – czyli substancja, którą ogólna teoria względności pozwala zakrzywiać, popychać i poruszać – również może mieć pewną bezwładność. Dla porównania inne możliwe modyfikacje ogólnej teorii względności są albo bardzo sztuczne, albo nieistotne z punktu widzenia ich wpływu na zjawiska fizyczne.

Z gęstością masy stałej kosmologicznej wiąże się pewna niezwykła właściwość. Chodzi o to, że jeśli wprowadzimy dodatnią gęstość masy przestrzeni, to musimy również dodać ujemne ciśnienie, którego wielkość będzie równa wprowadzonej gęstości masy pomnożonej przez kwadrat prędkości światła. W przypadku masy związanej z przestrzenią związek między gęstością i ciśnieniem jest podobny do słynnego wzoru $E = mc^2$, który wiąże energię z masą.

W latach dziewięćdziesiątych stała kosmologiczna otrzymała nową nazwę i jest obecnie znana jako *ciemna energia*. Nazwa ta odzwierciedla zmianę w rozumieniu znaczenia tej wielkości. Wykorzystując wiedzę zdobytą podczas badania pozostałych sił, współcześni fizycy zdają sobie sprawę, że gęstość przestrzeni nie jest jedynie parametrem występującym w ogólnej teorii względności, którego wartość nie ma żadnego innego znaczenia. Parametr ten musi być związany z pozostałymi dziedzinami fizyki i uwzględniać wkład pochodzący z wielu różnych źródeł. Byłoby czymś niezwykłym, gdyby przestrzeń we Wszechświecie wypełnionym niespokojnymi polami kwantowymi była pozbawiona bezwładności.

W 1998 roku astronomowie odkryli ciemną energię. Ściśle rzecz biorąc, zauważyli, że szybkość rozszerzania się Wszechświata jest coraz większa, co można wyjaśnić, jeśli założymy istnienie ujemnego ciśnienia. Do takiego

wniosku doszli na podstawie pomiarów przesunięcia ku czerwieni – podobnych do tych, jakie wykonywał kiedyś Hubble, ale z wykorzystaniem supernowych zamiast cefeid. Ponieważ supernowe są dużo jaśniejsze, można je obserwować na dużo większych odległościach.

Zmierzona przez nich gęstość przestrzeni jest niezwykle mała z punktu widzenia wartości, z jakimi mamy do czynienia na co dzień. Objętość przestrzeni równa objętości Ziemi waży około 7 miligramów. Wewnątrz Układu Słonecznego, a nawet całej Galaktyki wkład wnoszony przez przestrzeń do całkowitej masy jest zaniedbywalnie mały w porównaniu z masą zwyczajnej materii (lub ciemnej materii). Jednak międzygalaktyczna przestrzeń obejmuje tak ogromne pustki, że nawet tak mała wartość gęstości występująca w każdym miejscu kosmosu sumuje się do wartości, która wnosi dominujący wkład do całkowitej masy Wszechświata.

Obecnie ciemna energia stanowi około 70 procent masy Wszechświata. Nikt nie wie, dlaczego kilka różnych dużo większych wkładów pochodzących z różnych źródeł – niektóre mają wartość dodatnią, inne ujemną – daje ostatecznie taką, a nie inną wartość końcową. Jest to wielka kosmiczna tajemnica.

*Kosmologiczny „Model Standardowy”*

Skoro ciemna materia i ciemna energia (prawdopodobnie) stanowią razem największą część masy Wszechświata, to możemy się spodziewać, że musiały odgrywać istotną rolę również w jego przeszłości. Jeśli chcemy „odtworzyć film od końca” i sprawdzić to przypuszczenie, musimy nieco bardziej szczegółowo określić, jakie są własności ciemnej materii i ciemnej energii. Analiza Wielkiego Wybuchu stwarza okazję do poznania cech tej ciemnej strony. Jeśli nasze założenia odnośnie do charakterystyki ciemnej materii i ciemnej energii będą błędne, to model Wielkiego Wybuchu nie doprowadzi do powstania takiego Wszechświata, jaki obserwujemy.

Ze względu na to, jak mało wiemy na temat ciemnej strony, konieczność odgadnięcia, jak mogła się zachowywać ciemna materia i ciemna energia w tych najwcześniejszych chwilach Wielkiego Wybuchu, może się wydawać zadaniem ponad siły. Na szczęście okazuje się, że wcale nie musimy wiele wiedzieć, i kilka prostych założeń przyniosło nadspodziewanie dobre efekty.

Zakładamy, że ciemna materia musi się składać z jakiegoś rodzaju cząstek, które bardzo słabo oddziałują zarówno z normalną materią, jak i między sobą. Przyjmujemy również, że na samym początku ciemna materia znajdowała się w stanie równowagi z resztą kosmicznej kuli ognia, ale dość szybko się odłączyła i utworzyła trwałą poświatę z rodzaju tych, które omówiliśmy w rozdziale 6. Należy jednak w tym miejscu zwrócić uwagę na pewną subtelną cechę, która przesądziła o niepowodzeniu pierwszych kandydatur na cząstki ciemnej materii. Chodzi o to, że w chwili odłączenia się cząstki ciemnej materii musiały się przemieszczać z prędkością dużo mniejszą od prędkości światła[70]. Ponieważ (z założenia) jedyną siłą, jaka ma tutaj znaczenie, jest grawitacja, a grawitacja nie rozróżnia poszczególnych postaci materii, nic więcej już nie musimy wiedzieć. Przyjąwszy takie założenia, możemy obliczyć, jak ciemna materia poruszała się po odłączeniu od kosmicznej kuli ognia i jak wpływała na resztę Wszechświata. W ten sposób definiuje się tak zwany model zimnej ciemnej materii.

W odniesieniu do ciemnej energii przyjmujemy ideę Einsteina, a więc uznajemy, że stanowi ona gęstość samej przestrzeni, z którą związane jest pewne ujemne ciśnienie.

Wprowadzając takie założenia, możemy przeanalizować ewolucję kontrastu gęstości, który zmierzyliśmy w kosmicznym mikrofalowym promieniowaniu tła powstałym 380 000 lat po Wielkim Wybuchu, i ustalić, jak zmieniał się z biegiem czasu, aż do chwili obecnej. Jak się okazuje, po dodaniu ciemnej materii niestabilności narastają szybciej. W ten sposób modele Wszechświata ewoluują do postaci przypominającej nasz kosmos. Bez ciemnej materii jest to niemożliwe. To oznacza, że dzięki ciemnej stronie i wykorzystaniu mechanizmu niestabilności grawitacyjnej kosmologia Wielkiego Wybuchu pozwala nam uzyskać maleńkie zarodkowe kontrasty gęstości struktur obserwowanych w dzisiejszym Wszechświecie.

# AKSJONY: KWANTY CZYSTOŚCI

Gdy byłem nastolatkiem, jeździłem czasem z mamą na zakupy do supermarketu. Pewnego razu zauważyłem na półce proszek do prania o nazwie Axion. Pomyślałem sobie wtedy, że „aksjon” to byłaby dobra nazwa dla jakiejś cząstki elementarnej. Jest krótka, chwytliwa i doskonale pasuje do takich terminów jak proton, neutron, elektron czy pion. Postanowiłem, że jeśli kiedykolwiek będę miał okazję ochrzcić jakąś cząstkę, to nazwę ją aksjonem.

Taka szansa pojawiła się w 1978 roku. Uświadomiłem sobie wtedy, że z wysuniętego przez Pecceiego i Quinn pomysłu wprowadzenia nowego pola kwantowego wynika pewna ważna konsekwencja, na którą autorzy tej hipotezy nie zwrócili uwagi[71]. Chodzi o to, że jak już mówiliśmy, pola kwantowe wytwarzają cząstki, które są ich kwantami. A to szczególne pole powinno produkować niezwykle interesujące cząstki. Te nowe kwanty mogłyby się mianowicie charakteryzować tą niespotykaną cechą, że pozwalałyby oczyścić teorię, eliminując problem prądu osiowego. Gwiazdy ustawiły się w sprzyjającej konfiguracji i na świecie pojawiły się aksjony – a przynajmniej w świecie fizyki teoretycznej.

(Nawiasem mówiąc, redaktorzy czasopisma „Physical Review Letters”, a być może również producenci proszku Axion nigdy zapewne nie zgodziliby się na wprowadzenie takiej nazwy, gdybym otwarcie napisał, jak wpadłem na ten pomysł. Aby tego uniknąć, wspomniałem, że ma ona związek z prądem osiowym, którego nazwa po angielsku brzmi: *axial current*).

## *W poszukiwaniu poświaty*

Właściwości aksjonów są właśnie takie, jakich oczekujemy w przypadku kosmologicznej ciemnej materii. Cząstki te bardzo słabo oddziałują z normalną materią i same ze sobą. Powstały w wysokiej temperaturze, a potem odłączyły się od kosmicznej kuli ognia. Ich trwała poświata, tak zwane tło aksjonowe, wypełnia cały Wszechświat. Z obliczeń wynika, że gęstość tła aksjonowego zgadza się z wyznaczoną obserwacyjnie gęstością ciemnej materii, a ponadto zaraz po swoim powstaniu aksjony znajdują się

praktycznie w stanie spoczynku. Tło aksjonowe spełnia zatem wszystkie wymagania kosmologii „zimnej ciemnej materii”.

Brzmi to bardzo pięknie, ale czy to prawda? Jak powiedzieliśmy, aksjony słabo oddziałują z materią, ale z teorii jasno wynika, że jednak oddziałują, i możemy określić, jak do tego dochodzi. Aby wykryć tło aksjonowe, musimy skonstruować nowe, czułe detektory, zaprojektowane specjalnie tak, by wykorzystać charakterystyczne własności tych cząstek. Tego wyzwania podjęły się obecnie setki fizyków, zarówno teoretyków, jak i specjalistów od wykonywania doświadczeń. Jeśli na tym świecie jest jakaś sprawiedliwość – i jeśli dopisze nam szczęście – to być może już wkrótce usłyszymy o sukcesie, który przejdzie do historii na równi z odkryciem Neptuna, kosmicznego mikrofalowego promieniowania tła, cząstki Higgsa, fal grawitacyjnych i egzoplanet. Zagadki naukowe mają często bardzo interesujące rozwiązania.

## PRZYSZŁOŚĆ TAJEMNIC

### *Jak kończą się tajemnice*

Val Fitch, odkrywca zjawiska łamania symetrii T, o którym mówiliśmy już wcześniej, był bardzo mądrym człowiekiem obdarzonym subtelnym poczuciem humoru. Pełnił funkcję dziekana wydziału fizyki Uniwersytetu w Princeton, gdy na początku swojej kariery naukowej pracowałem tam na stanowisku profesora. Pewnego razu opowiadałem mu o swoim najnowszym pomyśle związanym z aksjonami i ciemną materią i przy okazji mówiłem o łamaniu symetrii T tak, jak gdyby był to niepodważalny fakt naukowy odkryty już przez starożytnych. W końcu trudno by mi było sobie wyobrazić, że mogłoby być inaczej. W pewnym momencie Fitch uśmiechnął się łagodnie i powiedział: „Wczorajsze wybory dziś stanowią wzory”.

Taki jest los poprawnych rozwiązań naukowych zagadek. Przeżyłem to osobiście podczas badania swobody asymptotycznej i teorii QCD (chromodynamiki kwantowej). Przez kilka lat po dokonaniu przełomu towarzyszyły nam ogromne emocje i wątpliwości związane z pytaniem o to,

czy naprawdę udało nam się rozwiązać tajemnicę oddziaływania silnego. Na ważnych międzynarodowych konferencjach wygłaszano wykłady poświęcone „weryfikacji poprawności chromodynamiki kwantowej”, podczas których relacjonowano postępy w wykorzystaniu naszej teorii do wysuwania i sprawdzania konkretnych przewidywań. Z czasem jednak lista wątpliwości powoli się kurczyła i emocje zaczęły opadać. Obecnie tego samego rodzaju obliczenia, choć o wiele bardziej skomplikowane, wykonuje się bez większego rozgłosu. Nazywa się je „wyznaczaniem tła”. Wczorajsze wybory dziś stanowią wzory, a jutro stają się tłem.

*Wiedza i rozmyślanie*

Rozmyślając o przyszłości konkretnych zagadek, warto się również zastanowić nad przyszłością samego procesu ich rozwiązywania.

Fundacja Claya wyznaczyła nagrodę w wysokości miliona dolarów dla każdego, kto przedstawi dowód, że chromodynamika kwantowa przewiduje uwięzienie kwarków. Fizycy mają mniej wymagające, a może raczej należałoby powiedzieć – inne standardy. W moim odczuciu już dawno minęliśmy punkt, w którym istniały wątpliwości, czy kwarki są uwięzione. Z pomocą naszych krzemowych przyjaciół potrafimy obliczyć, jakiego rodzaju cząstki powstają w ramach chromodynamiki kwantowej, i wyniki tych obliczeń nie zostawiają zbyt dużego marginesu błędu. Wśród wyznaczonych w ten sposób cząstek nie ma swobodnych kwarków. Otrzymujemy cząstki o masach i własnościach takich, jakie cechują cząstki obserwowane w Naturze, i nic więcej ani mniej.

Czy w takim razie nagrodę powinien dostać superkomputer? A może programiści?

W 2017 roku do programu AlphaZero, nowatorskiego programu komputerowego wykorzystującego sztuczne sieci neuronowe, wprowadzono zasady gry w szachy, po czym program grał sam ze sobą przez kilka godzin, wyciągnął wnioski z rozegranych partii i osiągnął nadludzkie wyniki. Czy AlphaZero rozumie reguły tej gry? Każdemu, kogo w pierwszym odruchu korci, by odpowiedzieć: „Nie”, odsyłam do Emanuela Laskera, mistrza świata w szachach w latach 1894–1921[72], który powiedział:

> Na szachownicy kłamstwa i hipokryzja mają krótkie nogi. Twórcze myślenie ujawnia bezwzględnie wszelkie próby kłamstwa; bezlitosny fakt, którego zwieńczeniem jest mat, zadaje kłam hipokryzji.

Tego typu przykłady pokazują, że zawsze będą istniały sposoby zdobywania wiedzy, które są niedostępne dla ludzkiej świadomości. To jednak nie powinno chyba nikogo dziwić. My sami potrafimy robić wiele rzeczy, o których ludzka świadomość nie ma pojęcia. Umiemy na przykład przetwarzać informacje wzrokowe z niewiarygodną szybkością albo zmusić nasze ciało, by się wyprostowało, chodziło i biegło.

Genomy ludzi i innych stworzeń zamieszkujących Ziemię są wielką skarbnicą nieświadomej wiedzy. Potrafią rozwiązać wiele skomplikowanych problemów, które pojawiają się w procesie tworzenia funkcjonujących organizmów żywych, co daleko wykracza poza możliwości ludzkiej inżynierii. Genomy „nauczyły się” tego wszystkiego na drodze długiego, nieefektywnego procesu ewolucji biologicznej, a nie w wyniku logicznego rozumowania, i z całą pewnością nie mają świadomości, jak dużo wiedzą.

Fakt, że konstruowane przez nas maszyny potrafią wykonywać długie i dokładne obliczenia, przechowywać mnóstwo informacji i uczyć się dzięki temu, iż wszystko to robią z niewiarygodną szybkością, wyznacza zupełnie nową drogę zdobywania wiedzy. Takie urządzenia przesuną granice wiedzy w niespodziewanych kierunkach i dotrą do miejsc, do których sam ludzki umysł, bez pomocy z zewnątrz, nigdy nie zdołałby dotrzeć. Jednak umysł *wspomagany* przez maszyny może niewątpliwie pomóc w tych badaniach.

Szczególną umiejętnością ludzi, której nie mają inne organizmy wykształcone na drodze ewolucji ani – na razie – maszyny, jest zdolność dostrzegania luk w naszej wiedzy i czerpanie przyjemności z ich zapełniania. Zetknięcie się z tajemnicą jest wspaniałym przeżyciem, które dostarcza nam ogromnych emocji.

63 Albert Einstein, *Mój obraz świata*, przeł. Stanisław Łukomski, Wydawnictwo M. Fruchtmana, Warszawa 1935, s. 14–15 (przyp. tłum.).

64 Oczywiście, w tym miejscu rodzi się kolejne pytanie o to, jak *do tego* doszło. W rozdziałach 6 i 7 omówiliśmy kilka propozycji wyjaśnienia tej kwestii, między innymi idee inflacji i złożoności w prostocie.

65 Lub dziecko wcześniej zasypia.

66 Mezony K są bardzo niestabilnymi cząstkami podatnymi na oddziaływanie silne (a więc hadronami), których własności udało się szczegółowo zbadać w akceleratorach osiągających wysoką energię. Są najlżejszymi hadronami zawierającymi kwarki dziwne.

67 Oczywiście żadne zasady nie są święte w dogmatycznym, teologicznym znaczeniu tego słowa. Gdyby jednak okazało się, że zasada względności, mechaniki kwantowej lub lokalności jest błędna, musielibyśmy wiele rzeczy zacząć od samego początku, ponieważ zasady te doskonale działają i pozwalają wiele wyjaśnić. Innymi słowy, zasady te są prawdopodobnie o wiele bliższe najniższej warstwy niż symetria T.

68 Więcej informacji na temat tych „nadmiarowych” cząstek można znaleźć w dodatku. Znajomość ich szczegółowych własności nie jest konieczna do zrozumienia opisywanych tutaj odkryć.

69 Ta różnica mogłaby być źródłem ciemnej materii wypełniającej Wszechświat – za chwilę powiemy nieco więcej na ten temat.

70 Gdyby cząstki poruszały się zbyt szybko, doprowadziłyby do rozmycia zaburzeń grawitacyjnych i uzyskany w ten sposób model Wszechświata w niczym nie przypominałby naszego kosmosu.

71 Steven Weinberg uświadomił sobie to samo, niezależnie ode mnie.

72 Lasker jest również autorem ważnych prac z zakresu matematyki.

# 10

# Komplementarność poszerza horyzonty

Nieprzeciętną inteligencję poznaje się po tym, że potrafi przechowywać w umyśle jednocześnie dwie przeciwstawne idee i mimo to zachowuje zdolność do normalnego funkcjonowania.

F. Scott Fitzgerald

Nie ulega wątpliwości, że ta komplementarność obala scholastyczną ontologię. Czym jest prawda? Stawiamy sobie to pytanie Piłata nie w sceptycznym, antynaukowym sensie, ale raczej z ufnością, że dalsza praca w tych nowych okolicznościach doprowadzi do głębszego zrozumienia świata fizycznego i umysłowego.

Arnold Sommerfeld

*Komplementarność* w swojej najbardziej podstawowej postaci jest pojęciem, które oznacza, że jedna rzecz, rozważana z różnych perspektyw, może przejawiać różne, czasem nawet sprzeczne własności. Pozwala stosować podejście do analizy doświadczeń i problemów, które w moim przypadku okazało się niezwykle pouczające i pomocne. Komplementarność dosłownie odmieniła moje życie. Dzięki niej się rozwinąłem – stałem się bardziej otwarty na wyobraźnię i bardziej tolerancyjny. Przyjrzyjmy się więc razem tym cechom komplementarności, które pozwalają nam poszerzyć horyzonty, i spróbujmy spojrzeć na nie tak, jak ja je widzę.

Świat jest prosty i złożony, logiczny i dziwny, uporządkowany i chaotyczny. Opisując go na poziomie podstawowym, wcale nie pozbywamy się tych dualności. Przeciwnie – jak się przekonaliśmy, na

najniższym poziomie wszystkie te przeciwności jeszcze bardziej się uwypuklają i pogłębiają. Nie można rzetelnie przedstawić fizycznej rzeczywistości bez odwołań do komplementarności.

## KOMPLEMENTARNOŚĆ W NAUCE

Niels Bohr, wielki duński fizyk kwantowy, pierwszy zwrócił uwagę na ogromną siłę jednoczenia, jaka drzemie w komplementarności. Analizując suche fakty historyczne, moglibyśmy powiedzieć, że Bohr poznał komplementarność dzięki badaniom fizyki kwantowej. Patrząc z innej perspektywy, zauważylibyśmy jednak, że taki sposób myślenia był dla niego czymś naturalnym i stosował go jeszcze, zanim wniósł wyjątkowy wkład do mechaniki kwantowej – ba, można się nawet pokusić o stwierdzenie, że to właśnie dzięki niemu odniósł sukces w nauce. Niektórzy biografowie Bohra dopatrują się w tym wpływu Sørena Kierkegaarda, duńskiego mistyka i filozofa, którego uczony podziwiał.

Między odkryciem pierwszych przejawów zachowania kwantowego około roku 1900 a wykształceniem się współczesnej teorii kwantowej pod koniec lat dwudziestych fizycy mozolnie pracowali nad stworzeniem jakiegoś opisu teoretycznego, ale wydawało się, że nigdy nie uda im się pogodzić ze sobą wyników różnych doświadczeń. W tym okresie Bohr do perfekcji opanował umiejętność konstruowania modeli, które pozwalają wyjaśnić jedne obserwacje, ale strategicznie pomijają inne. Albert Einstein tak pisał o jego pracy:

> To, że takie niepewne i sprzeczne podstawy wystarczyły, by człowiek obdarzony niepowtarzalnym instynktem i taktem Bohra odkrył najważniejsze prawa […] atomu i wyjaśnił ich znaczenie w chemii, wydawało mi się kiedyś cudem – i wydaje mi się nim nawet dzisiaj. To jest najwyższa postać muzykalności w sferze myśli.

Bazując na takim doświadczeniu, Bohr przekształcił komplementarność w ważną zasadę, która przepływa z nauki do filozofii i staje się mądrością.

# KOMPLEMENTARNOŚĆ W MECHANICE KWANTOWEJ

W mechanice kwantowej najbardziej podstawowym opisem obiektu – bez względu na to, czy obiekt ten stanowi elektron, czy słoń – jest funkcja falowa. Jest ona swoistym surowcem, który musimy dopiero przetworzyć w przewidywania opisujące spodziewane zachowania danego obiektu. Aby uzyskać odpowiedź na różne pytania, możemy ją przekształcać na różne sposoby. Jeśli chcemy przewidzieć, gdzie nasz obiekt będzie się znajdował, musimy przetworzyć jego funkcję falową w jeden sposób. Jeśli chcemy przewidzieć, jak szybko się porusza, trzeba zastosować inną metodę.

Te dwa sposoby przetwarzania funkcji falowej można porównać do dwóch możliwych podejść do analizy utworu muzycznego, która może polegać na badaniu jego harmonii lub śledzeniu linii melodycznej. Badanie harmonii jest swoistą analizą lokalną – choć w tym wypadku interesuje nas określony moment w czasie, a nie punkt w przestrzeni – natomiast śledzenie przebiegu melodii odpowiada bardziej analizie globalnej. Harmonia jest jak położenie, melodia zaś jest niczym prędkość.

Nie możemy przekształcić funkcji falowej jednocześnie na te dwa różne sposoby, ponieważ wzajemnie się one wykluczają. Jeśli chcemy uzyskać informację o położeniu, musimy przetworzyć funkcję falową w sposób, który niszczy informację o prędkości, i odwrotnie.

Choć szczegółowy opis matematyczny tego procesu jest złożony, to należy w tym miejscu wyraźnie podkreślić, że za całym owym dość ogólnym opisem stoją solidne podstawy matematyczne. W teorii kwantowej – takiej, jak ją obecnie rozumiemy – komplementarność jest faktem matematycznym, a nie jedynie górnolotnym stwierdzeniem.

Omawiając kwantową komplementarność, posługiwaliśmy się do tej pory pojęciami matematycznymi – to znaczy mówiliśmy o funkcji falowej i jej przekształcaniu. Możemy spojrzeć na tę samą sytuację w inny, bardziej bezpośredni sposób, analizując przeprowadzone doświadczenia. W takim razie zamiast się zastanawiać, jak możemy przekształcić funkcję falową, by uzyskać jakieś przewidywania, musimy spytać o to, jak należy oddziaływać na cząstkę, by zmierzyć jej własności.

W matematycznym formalizmie teorii kwantowej komplementarność położenia i prędkości jest jednym z twierdzeń. Jednak matematyczny opis

tej teorii, ze wszystkimi jego niezwykłymi własnościami, to próba przedstawienia Natury, a nie prawda objawiona. Wystarczy wspomnieć, że wielu twórców teorii kwantowej, z Einsteinem włącznie, początkowo dość sceptycznie odnosiło się do jej dojrzałej matematycznej postaci.

Fakt, że teoria kwantowa nie potrafi przewidzieć jednocześnie położenia i prędkości, musi się przekładać na niemożność jednoczesnego zmierzenia obu tych wielkości w doświadczeniu. Gdyby się okazało, że możemy zmierzyć zarówno położenie, jak i prędkość, to w celu opisania wyników takich pomiarów musielibyśmy wymyślić jakąś nową teorię matematyczną, różną od teorii kwantowej i jej sposobów przetwarzania funkcji falowej.

Wkrótce po wymyśleniu podstaw współczesnej teorii kwantowej młody Werner Heisenberg uświadomił sobie, że uzyskany opis matematyczny prowadzi do niepojącego wniosku, iż nie można jednocześnie zmierzyć położenia i prędkości. Swoje przemyślenia wyraził w formie „zasady nieoznaczoności". Jedną z kluczowych kwestii, jakie wiążą się z jego zasadą, jest pytanie o to, czy rzeczywiście opisuje ona poprawnie fakty – czyli wielkości, które możemy obserwować – przejawiające się w fizycznym świecie. Pytanie to nie dawało Heisenbergowi spokoju, a później nękało również Einsteina i Bohra.

Na poziomie fizycznego zachowania ten konflikt – ta komplementarność – jest odzwierciedleniem dwóch kluczowych kwestii. Pierwszą jest fakt, że *jeśli chcemy zmierzyć własności jakiegoś obiektu*, *to musimy wejść z nim w oddziaływanie*. Innymi słowy, pomiary nie pokazują „rzeczywistości", ale jedynie ją próbkują.

Jak ujął to Bohr:

> W teorii kwantowej […] logiczne wyjaśnienie niespodziewanych do tej pory podstawowych reguł […] wymaga uznania, że nie można wprowadzać wyraźnego rozgraniczenia między niezależnym zachowaniem obiektów a ich oddziaływaniem z przyrządami pomiarowymi.

Drugą kluczową kwestią, która jeszcze bardziej uwypukla wagę pierwszej, jest fakt, że *dokładne pomiary wymagają silnych oddziaływań*.

Mając obie te kwestie na uwadze, Heisenberg rozważał wiele różnych metod, które mogłyby pozwolić na jednoczesne zmierzenie położenia i prędkości cząstek elementarnych, jednak za każdym razem dochodził do wniosku, że jego zasada nieoznaczoności pozostaje spełniona. Ta analiza umocniła przekonanie uczonego, że dziwny opis matematyczny teorii kwantowej odzwierciedla dziwne zachowanie świata fizycznego.

Obie wspomniane przed chwilą zasady – to, że obserwacja jest procesem czynnym, i to, że nieodłącznie wiąże się z ingerencją w obserwowany obiekt – stanowią podstawę analizy Heisenberga. Bez nich nie możemy wykorzystywać matematycznego formalizmu teorii kwantowej do opisu fizycznej rzeczywistości. Niestety, zasady te podważają model świata, który każdy z nas konstruuje w dzieciństwie. Nasz wewnętrzny model zakłada, że istnieje ścisłe rozgraniczenie między nami a światem zewnętrznym, istniejącym „poza nami", którego własności możemy ustalić na drodze obserwacji. Akceptując wnioski płynące z odkryć Heisenberga i Bohra, musimy sobie uświadomić, że nie ma takiego ścisłego rozgraniczenia. Obserwując świat, bierzemy udział w jego powstawaniu.

Heisenberg prowadził swoje prace nad zasadą nieoznaczoności w instytucie Bohra w Kopenhadze. Obaj uczeni często ze sobą dyskutowali i wytworzyła się między nimi silna więź będąca swoistym naukowym odpowiednikiem relacji między ojcem i synem. Pierwsze pomysły Bohra dotyczące komplementarności są owocem interpretacji dokonań Heisenberga.

Einstein nie zgadzał się z ustaleniami Bohra i Heisenberga, a komplementarność budziła jego niepokój. Nie podobała mu się możliwość istnienia dwóch poprawnych, a mimo to nieprzystających do siebie punktów widzenia. Miał nadzieję, że uda mu się uzyskać pełne zrozumienie, które będzie uwzględniało wszystkie możliwe punkty widzenia. W szczególności pragnął znaleźć metodę pozwalającą wyznaczyć jednocześnie położenie i prędkości cząstki. Wiele nad tym rozmyślał i próbował zaproponować doświadczenia, w których będzie można jednocześnie ustalić położenie i prędkość (lub pęd)[73] cząstki. Pomysłowe eksperymenty myślowe Einsteina były o wiele bardziej skomplikowane od przypadków, które rozważał wcześniej Heisenberg.

Podczas słynnej debaty między Bohrem i Einsteinem, którą Bohr opisał w raporcie zatytułowanym *Discussions with Einstein on Epistemological*

*Problems in Atomic Physics* (Dyskusje z Einsteinem na temat problemów epistemologicznych w fizyce atomowej), Einstein raz za razem rzucał Bohrowi wyzwanie, przedstawiając coraz to nowe eksperymenty myślowe. Wysuwane przez Einsteina pomysły miały podważyć różne aspekty kwantowej komplementarności, między innymi komplementarność energii i czasu. Odpowiadając na każde z tych wyzwań, Bohr wskazywał na subtelne błędy w analizie Einsteina i z powodzeniem bronił fizycznej spójności teorii kwantowej.

Te debaty, a także inne, późniejsze spory naukowe przyczyniły się do wyjaśnienia natury teorii kwantowej i do tej pory nikomu nie udało się podważyć jej poprawności. Tymczasem naukowcy i inżynierowie zaczęli wykorzystywać teorię kwantową do budowy wielu wspaniałych urządzeń, od laserów przez iPhony do nawigacji satelitarnej. Wszystkie te projekty oparte na mechanice kwantowej mogłyby nie działać, a przecież spisują się świetnie. Jeśli prawdą jest, że „to, co nas nie zabije, czyni nas silniejszymi", to teoria kwantowa – i wynikająca z niej komplementarność – muszą być naprawdę silne.

(Jeśli ktoś się zastanawia, jakie to wszystko ma znaczenie w odniesieniu do wspominanego wcześniej słonia, to wyjaśnijmy, że kwantową nieoznaczoność, choć pozostaje ona obowiązującą zasadą, można bezpiecznie w tej sytuacji pominąć. Możemy bez problemu zmierzyć zarówno położenie, jak i pęd słonia z dokładnością, która będzie wystarczająca dla wszystkich praktycznych zastosowań. Nieoznaczoność tych wielkości, w porównaniu z ich faktyczną wartością, jest zaniedbywalnie mała. Gdy jednak mamy do czynienia z elektronami i atomami, jest to już zupełnie inna historia).

## POZIOMY OPISU

Innym źródłem komplementarności jest posługiwanie się opisami na różnych poziomach. Gdy opis jakiegoś układu staje się zbyt skomplikowany po użyciu jednego rodzaju modelu, możemy czasami znaleźć model komplementarny, oparty na innych zasadach, który pozwala znaleźć odpowiedzi na ważne pytania.

Przedstawmy prosty, konkretny przykład obrazujący podstawową ideę, z której wynikają ważne wnioski istotne w wielu praktycznych zastosowaniach. Gaz wypełniający balon na gorące powietrze składa się z ogromnej liczby atomów. Gdybyśmy chcieli przewidzieć zachowanie tego gazu, wykorzystując prawa mechaniki do opisu tworzących go atomów, musielibyśmy się uporać z dwoma trudnym problemami:

• Zgadzając się na użycie mechaniki klasycznej (jako przybliżenia), musielibyśmy ustalić położenie i prędkość każdego atomu w określonej chwili początkowej, ponieważ takie dane są potrzebne do rozwiązania odpowiednich równań. Zebranie i przechowywanie takiego mnóstwa danych byłoby całkowicie niepraktyczne, a mechanika kwantowa jeszcze tylko bardziej ten problem pogarsza.

• Nawet gdyby jakoś udało nam się zebrać i zapisać gdzieś wszystkie te dane, wykonanie obliczeń potrzebnych do wyznaczenia ruchu cząstek okazałoby się jeszcze mniej praktyczne.

Niemniej jednak doświadczeni piloci latają balonami na gorące powietrze i nie mają wątpliwości, jak nimi sterować. Pod pewnym względem powietrze zachowuje się w łatwo przewidywalny sposób.

Wprowadzając zupełnie inne pojęcia – gęstości, ciśnienia i temperatury – możemy uprościć prawa opisujące zachowanie powietrza w dużej skali. To właśnie te pojęcia, a nie opis na poziomie atomowym, pozwalają uzyskać odpowiedzi na pytania interesujące pilotów. Opis atomowy jest w zasadzie dużo bogatszy, ale większość tych informacji będzie bezużyteczna dla kogoś, kto chce polecieć balonem (gorzej nawet – te dodatkowe dane mogą zaciemniać obraz całościowy). Rozważmy na przykład położenie i prędkość dowolnego atomu. Wielkości te szybko się zmieniają w wyniku ruchu atomu i zderzeń z innymi cząsteczkami. Faktyczna trajektoria atomu zależy od dokładnych wartości początkowych tych wielkości, a także od tego, co robią inne atomy. To oznacza, że wyznaczenie położenia i prędkości konkretnej cząstki jest diabelnie trudne, a w dodatku informacja ta bardzo szybko się dezaktualizuje. Krótko mówiąc, takie podejście nie jest ani łatwe, ani nie udziela rzetelnych odpowiedzi. Gęstość, ciśnienie i temperatura zachowują się pod tym względem o wiele lepiej. Odkrycie i ilościowe opisanie tych prostych, stabilnych własności, które można

wykorzystać do uzyskania odpowiedzi na ważne pytania, było dużym osiągnięciem naukowym.

Większość badań naukowych ma na celu znalezienie prostych, stabilnych własności, które pozwalają uzyskać odpowiedzi na interesujące nas pytania. Czasami nazywamy te wielkości własnościami emergentnymi. (Spotkaliśmy się już ze zjawiskiem tego typu w rozdziale 7, choć analizowaliśmy je wtedy z nieco innego punktu widzenia). Zdefiniowanie użytecznych własności emergentnych i przedstawienie praktycznego sposobu ich wykorzystania może być dużym osiągnięciem. W historii nauk ścisłych znajdziemy wiele przykładów wprowadzenia takich ważnych własności (entropia, wiązanie chemiczne, sztywność i tak dalej), na których bazuje dużo użytecznych modeli.

Z podobną sytuacją mamy do czynienia również poza naukami ścisłymi. Bardzo chcielibyśmy na przykład poznać jakiś bardziej praktyczny sposób wyjaśnienia zachowania ludzi lub rynku giełdowego. „Atomowe” wersje tych dziedzin wiedzy, wychodzące od opisu zachowania pojedynczych neuronów lub poszczególnych inwestorów – nie mówiąc już o zachowaniu kwarków, gluonów, elektronów i fotonów, z których przecież składają się neurony i inwestorzy – są beznadziejnie skomplikowane. Okażą się zupełnie niepraktyczne, jeśli spróbujemy je wykorzystać do tego, by dobrze sobie radzić w społeczeństwie lub zbić majątek na giełdzie.

Dlatego posługujemy się innymi pojęciami, które znajdziemy w podręcznikach psychologii i ekonomii. Pojęcia te, pozwalające uzyskać odpowiedzi na pytania dotyczące dużych skal, bazują na modelach ludzi i rynków giełdowych i są komplementarne wobec szczegółowych modeli „atomowych”. W psychologii i ekonomii nie mamy jeszcze zbyt wielu modeli, które działałyby równie niezawodnie jak skonstruowany przez fizyków model gazu. W tych dziedzinach nauki nadal trwają poszukiwania odpowiednich własności emergentnych i wynikających z nich użytecznych modeli.

Możliwość opisania świata za pomocą jego najbardziej podstawowych składników sprawia ogromną satysfakcję. Czujemy więc pokusę, by uznać, że właśnie taki opis jest idealny, natomiast pozostałe opisy, operujące na wyższym poziomie, stanowią tylko przybliżenie – kompromis świadczący o niedoskonałościach naszego rozumienia świata. Taka postawa, odrzucająca dobre opisy, jest pozornie głęboka i głęboko powierzchowna.

Aby znaleźć odpowiedź na interesujące nas pytanie, często musimy zmienić punkt widzenia. Odkrywanie – lub wynajdowanie – nowych pojęć i nowych sposobów ich wykorzystania jest nigdy niekończącą się twórczą aktywnością. Informatycy i programiści doskonale wiedzą, że projektując dobre algorytmy, należy zwrócić szczególną uwagę na to, jak zapisuje się w nich wiedzę. Dobry sposób przedstawienia informacji może decydować o różnicy między wiedzą użyteczną i wiedzą, która „w zasadzie" tam jest, ale tak naprawdę jest niedostępna, ponieważ jej znalezienie i wykorzystanie zajmuje zbyt dużo czasu i okazuje się zbyt kłopotliwe. Można to porównać do różnicy między posiadaniem sztabek złota i wiedzą, że w zasadzie w oceanie znajdują się ogromne ilości złota w postaci pojedynczych atomów unoszących się w wodzie.

Z tego powodu pełne zrozumienie podstawowych praw, jeśli kiedykolwiek je osiągniemy, nie będzie oznaczało ani uzyskania „teorii wszystkiego", ani „końca nauki"[74]. Nadal będą nam potrzebne komplementarne opisy rzeczywistości. Wciąż pozostanie dużo ważnych pytań bez odpowiedzi i mnóstwo pracy naukowej do wykonania.

Zawsze tak będzie.

## DALEJ NIŻ NAUKA: KOMPLEMENTARNOŚĆ JAKO MĄDROŚĆ

### *Przykłady z zakresu sztuki*

Moja dobra znajoma, muzyk Minna Pöllänen, zwróciła uwagę na piękny przykład komplementarności, o którym już wcześniej wspomnieliśmy. Mam na myśli to, że w muzyce polifonicznej zachodzą równocześnie dwa bardzo różne procesy – każdy głos wykonuje niezależnie swoją linię melodyczną, a jednocześnie cały zespół tworzy kolejne harmonie. Możemy skupić uwagę na melodiach lub na harmoniach. Każda z tych możliwości jest satysfakcjonującym sposobem odbioru muzyki. Możemy się dowolnie przełączać z jednego sposobu na drugi, ale nie da się tak naprawdę stosować obu jednocześnie.

Picasso wraz z kubistami stworzył styl malarski, który pozwala uchwycić komplementarność na obrazie. Przedstawiając na jednym płótnie wybraną

scenę z różnych perspektyw, artyści tego nurtu zyskali ogromną swobodę w pokazywaniu tych aspektów, które są dla nich ważne. Tak samo rysują małe dzieci. Dziwne przerysowania i zestawienia obecne w takich dziełach sztuki prezentują różne punkty widzenia, które można uznać za sprzeczne. W świecie fizycznym zobaczenie tego wszystkiego jednocześnie byłoby niemożliwe. Taka dosłowna komplementarność bywa czarująca na rysunku dziecka, a w dziełach mistrzów jest przejawem geniuszu.

*Modele ludzi – swobodne i deterministyczne*

W umyśle tworzymy również modele innych ludzi, które służą nam do uzyskiwania odpowiedzi na związane z nimi pytania. Jeśli na przykład chcemy przewidzieć, jak ktoś się zachowa w określonej sytuacji, możemy wziąć pod uwagę jego osobowość, stan emocjonalny, historię życia, kulturę, w której się wychował, i tak dalej. Krótko mówiąc, tworzymy modele umysłów i motywacji innych osób. Głównym elementem takich modeli jest pojęcie woli, czyli możliwość dokonywania wyboru.

Gdybyśmy natomiast chcieli przewidzieć, co by się stało z tą samą osobą, gdyby się znalazła w miejscu eksplozji jądrowej, to musielibyśmy sięgnąć po zupełnie inny model bazujący na fizyce. W tym przypadku umysł i wolna wola w ogóle się nie liczą.

Oba modele – zarówno ten uwzględniający działanie umysłu i psychologię, jak i ten, który bierze pod uwagę zachowanie materii i fizykę – są poprawne. Każdy pozwala nam odpowiadać na innego rodzaju pytania. Jednak żaden z nich nie jest pełny i nie można ich stosować zamiennie. Ludzie *dokonują* wyborów, a ich ciała *podlegają* takim samym prawom jak cała materia. To są fakty znane z codzienności, które zawsze obowiązują. W duchu komplementarności akceptujemy je oba. Mamy pełną świadomość tego, że jedno nie przeczy drugiemu. Fakty nie mogą sobie wzajemnie przeczyć. Mogą jedynie odzwierciedlać różne sposoby przetwarzania rzeczywistości.

Czy ludzie mają wybór, gdy podejmują kolejne działania, czy też są jedynie marionetkami tańczącymi w rytm fizyki matematycznej? Takie pytanie jest źle sformułowane – można je porównać do pytania o to, czy muzyka jest harmonią, czy melodią.

Wolna wola jest podstawowym pojęciem w naukach związanych z prawem i moralnością, natomiast fizyka doskonale się bez niego obywa. Usunięcie wolnej woli z tekstów prawniczych lub wprowadzenie jej do fizyki wprowadziłoby ogromny zamęt w każdej z tych dziedzin. Byłoby to coś zupełnie niepotrzebnego! Wolna wola i fizyczny determinizm są komplementarnymi aspektami rzeczywistości.

*Komplementarność, poszerzanie umysłu i tolerancja*

Spróbujmy określić jeszcze raz, stosując prostsze pojęcia, podstawowe wnioski wynikające z komplementarności:
• Rodzaj pytań, na które szukamy odpowiedzi, decyduje o tym, jakich pojęć powinniśmy używać.
• Różne, czasem nawet wzajemnie sprzeczne sposoby analizy tego samego zagadnienia mogą niezależnie doprowadzić do ujawnienia ważnych faktów.

Komplementarność zachęca więc nas do rozważania różnych punktów widzenia. Zagadkowe pytania, fakty lub dziwne zachowanie stają się w duchu komplementarności okazją do spojrzenia na dane zagadnienie z innej perspektywy, która może ujawnić nowe informacje poszerzające naszą wiedzę. Patrzenie z różnych punktów widzenia sprzyja poszerzaniu umysłu.

Dlaczego nie mielibyśmy zastosować takiego podejścia w odniesieniu do pozornych konfliktów między sztuką i nauką, filozofią i nauką, religią A i religią B czy religią i nauką?

Spojrzenie na świat w inny sposób może być odkrywcze.

Ważny wpływ na ukształtowanie się mojej osobowości miał wczesny kontakt z katolicyzmem, co zachęciło mnie do myślenia w kategoriach kosmosu i poszukiwania znaczeń ukrytych pod powierzchnią rzeczywistości. Takie podejście stało się moją trwałą cechą i postępowałem w ten sposób nawet wtedy, gdy porzuciłem już ścisłe dogmaty wiary. Obecnie często wracam do Platona, świętego Augustyna, Davida Hume’a i „nieaktualnych” starych prac naukowych – Galileusza, Newtona, Darwina czy Maxwella – by prowadzić dialog z wielkimi umysłami i ćwiczyć umiejętność myślenia w inny sposób.

Oczywiście, próbując zrozumieć inne punkty widzenia, niekoniecznie musimy się z nimi zgadzać, a już na pewno nie należy ich uznawać za własne. Zgodnie z duchem komplementarności powinniśmy zachować bezstronność. Ideologie i religie, które twierdzą, że mają wyłączne prawo wyznaczania „jedynie słusznych" poglądów, są sprzeczne z duchem komplementarności.

Należy tu podkreślić, że nauka ma w tym względzie specjalny status. Zyskała ogromną wiarygodność, zarówno jako skarbnica wiedzy, jak i jako metoda analizowania fizycznej rzeczywistości, co wynika z sukcesu wielu jej zastosowań. Niewątpliwie uczeni ograniczający się do wąskich specjalności nie rozwijają swojego umysłu, natomiast ludzie, którzy unikają nauki, zubażają swój obraz świata.

## PRZYSZŁOŚĆ KOMPLEMENTARNOŚCI

### *Dokładność i zrozumiałość*

Pojawienie się superkomputerów i sztucznej inteligencji zmieniło rodzaj stawianych przez nas pytań i wpływa również na to, jakich odpowiedzi możemy się spodziewać.

Bohr czasami żartował, mówiąc o komplementarności między przejrzystością i prawdą. Jest to zbyt daleko idące stwierdzenie, ponieważ w niektórych przypadkach, na przykład gdy mamy do czynienia z podstawami arytmetyki, możemy osiągnąć przejrzystość i jednocześnie zachować zgodność z prawdą.

Jednak w dobrych modelach naukowych wymagających użycia nadludzkich możliwości obliczeniowych pojawia się podobna komplementarność, którą należy traktować już jak najbardziej serio. W grze w szachy i go, których opanowanie na poziomie mistrzowskim było kiedyś uważane za przejaw najwyższej inteligencji, najlepszymi graczami są obecnie programy komputerowe.

Każdej z tych gier poświęcono ogromną liczbę książek i artykułów, w których najlepsi zawodnicy wyjaśniają pojęcia służące im do porządkowania wiedzy. Dzisiejsi mistrzowie – komputery – nie używają

tych pojęć. Ludzkie pojęcia są dostosowane do mózgów o ogromnych możliwościach używania wyobraźni wzrokowej i przetwarzania równoległego, które jednak tylko w dość ograniczonym zakresie mogą korzystać z pamięci i działają z niezbyt dużą prędkością. Komputer potrafi rozwinąć zupełnie inne pojęcia, ale także odkryć konstrukcje odpowiadające ludzkim ideom, rozgrywając bardzo dużą liczbę partii sam ze sobą i analizując, które posunięcia przynoszą najlepszy skutek – czyli stosując naukową metodę wyciągania wniosków z doświadczeń.

Na gruncie chromodynamiki kwantowej, czyli teorii oddziaływania silnego, istnieją pojęcia, które mają tworzyć pomost między podstawowymi równaniami opisującymi kwarki i gluony i bardziej złożonymi obiektami występującymi w Naturze. Dzięki nim ludzki umysł może uchwycić sedno rozważanych problemów. Jednak w chwili obecnej nie ulega wątpliwości, że najlepiej sprawdzająca się strategia polega na pozostawieniu wszystkich obliczeń superkomputerom, do których wcześniej wprowadzono minimalny zestaw instrukcji.

Te przykłady niewątpliwie są wyjątkowe ze względu na swoją przejrzystość (i zgodność z prawdą), ale podstawowe zjawisko, którego są przejawem – fakt, że maszyny myślące mogą odkrywać i stosować modele zupełnie nieodpowiednie dla ludzkiego umysłu – będzie prawdopodobnie w coraz większym zakresie stanowiło część naszej rzeczywistości.

Krótko mówiąc, zrozumiałość dla człowieka i dokładne zrozumienie stanowią parę cech komplementarnych.

### *Skromność i szacunek dla samego siebie*

W moim odczuciu najważniejszym przesłaniem płynącym z naszej analizy podstaw rzeczywistości jest komplementarność między skromnością i szacunkiem dla samego siebie. Komplementarność ta pojawia się w wielu różnych sytuacjach, można więc powiedzieć, używając języka muzyki, że przypomina temat z dużą liczbą wariacji. Ogrom przestrzeni całkowicie nas przytłacza, ale w naszym ciele znajduje się niezliczona liczba neuronów i oczywiście jeszcze więcej tworzących je atomów. Okres kosmicznej historii jest o wiele dłuższy od czasu ludzkiego życia, ale mamy wystarczająco dużo czasu, by snuć ogromną liczbę myśli. Energie spotykane w kosmosie przekraczają wszystko, co człowiek ma do

dyspozycji, ale dostępna dla nas energia wystarcza do kształtowania naszego bezpośredniego otoczenia i czynnego uczestniczenia w życiu wśród innych ludzi. Świat jest tak złożony i pełen tajemnic, że przekracza możliwości naszego rozumienia, ale wiele udało nam się już dowiedzieć i wciąż poszerzamy swoją wiedzę. Skromność jest więc jak najbardziej na miejscu, podobnie jak szacunek dla samego siebie.

Upłynie zapewne jeszcze wiele dziesięcioleci, zanim autonomiczna sztuczna inteligencja ogólnego przeznaczenia osiągnie ludzki poziom. Ale motywacja stojąca za tym nieuniknionym rozwojem jest tak silna, że jeśli tylko nie nastąpi jakaś katastrofa w postaci wojen, zmian klimatycznych czy plag, proces ten potrwa najwyżej sto lub dwieście lat. Ze względu na przewagę maszyn pod względem szybkości myślenia, możliwości postrzegania i siły fizycznej zamiast nieznacznie ulepszonego *Homo sapiens* awangardę inteligencji już wkrótce będą stanowić cyborgi i supermózgi.

Nie można również odrzucić możliwości, że dzięki inżynierii genetycznej pojawią się istoty o nadludzkich możliwościach. Będą mądrzejsze, silniejsze i (mam nadzieję) obdarzone większą empatią niż dzisiejsi ludzie.

Uświadomienie sobie, że te majaczące na horyzoncie możliwości faktycznie mogą się ziścić, otwiera przed nami wszystkimi, którzy obecnie żyjemy, jeszcze jeden wymiar skromności. Mimo to nawet w takim kontekście nie powinniśmy zapominać o szacunku dla samego siebie. W poruszającym fragmencie powieści *Odd John* (Dziwny John) z 1935 roku Olaf Stapledon, jedyny w swoim rodzaju geniusz literatury fantastycznonaukowej, ustami swojego bohatera, który jest nadludzką (zmutowaną) istotą inteligentną, nazywa *Homo sapiens* „archeopteryksem ducha”[75]. Bohater powieści Stapledona kieruje te słowa z ogromną czułością do swojego przyjaciela i biografa, który jest zwyczajnym człowiekiem.

Archeopteryks był wspaniałym stworzeniem i, jak podejrzewam, wiódł szczęśliwe życie. Latając – być może nieporadnie, ale lepiej niż inne ówczesne stworzenia i lepiej niż jego przodkowie – musiał odczuwać ogromną satysfakcję. Wspaniałość archeopteryksa staje się jeszcze większa, a nie mniejsza, dzięki temu, że jego potomkowie osiągnęli tak wysoki poziom rozwoju.

73 Omawiając zasadę nieoznaczoności, mówiliśmy o niemożności pogodzenia pomiaru położenia z pomiarem prędkości. W literaturze fachowej zamiast prędkości częściej mówi się o pędzie, ponieważ z wielu względów posługiwanie się tą wielkością jest wygodniejsze. Czułem się w obowiązku, by o tym wspomnieć, ale nadal będziemy mówili tu o prędkości, ponieważ ta wielkość jest dla wielu z nas łatwiejsza do zrozumienia.

74 Te dwa określenia, pojawiające się często w tekstach popularnonaukowych, budzą moją szczególną irytację.

75 Archeopteryks jest wymarłym gatunkiem o cechach zarówno dinozaura, jak i ptaka, który stanowi ogniwo łączące dinozaury przykute do ziemi z ptakami szybującymi w przestworzach.

# Posłowie: długa podróż do domu

Podstawy nauki nie są wygodne. Poszerzając naszą wiedzę, stanowią wyzwanie dla utartych sposobów myślenia. Co najważniejsze, zaostrzają kryteria odnośnie do tego, co należy uważać za prawdziwą wiedzę. Zwiększają wymagania tak bardzo, że cała wiedza, jaką udało nam się do tej pory zdobyć, wydaje się zupełnie nieodpowiednia. Właśnie to miał na myśli John R. Pierce, gdy ironicznie stwierdził: „nigdy już nie zrozumiemy natury tak dobrze jak greccy filozofowie”.

Podstawy nauki mogą podważyć wiarę w nabyte przekonania i zdrowy rozsądek. W szczególności nie pozwalają nam traktować poważnie mitologicznych opowieści o różnych zjawiskach naturalnych. Chyba trudno byłoby obecnie komukolwiek uwierzyć, że Apollo wozi Słońce po niebie w swoim rydwanie.

Ten proces może mieć znacznie szerszy charakter, wykraczający poza dyskredytację oczywistych absurdów. Wiedza naukowa rodzi tak obfite i wspaniałe owoce, że po zjedzeniu z Drzewa Wiedzy wszystko inne może stać się niesmaczne. Literatura nienaukowa może się nagle wydać zatęchła, nienaukowa filozofia – głupia, nienaukowa sztuka – bezcelowa, nienaukowe tradycje – puste i, oczywiście, nienaukowa religia – bezsensowna. Gdy miałem kilkanaście lat i po raz pierwszy zachłysnąłem się współczesną nauką, właśnie tak uważałem.

Gdyby dotkliwe zawężenie poglądów było kosztem, jaki trzeba ponieść, by móc zrozumieć podstawy naukowe, to wielu ludzi nie bez racji stwierdziłoby, że jest to zbyt wygórowana cena. Na szczęście podstawy nauki nie wymagają od nas stosowania zasad naukowych tam, gdzie nie jest to niezbędne.

Nauka pozwala wyjaśnić wiele ważnych faktów odnośnie do tego, jak przebiegają różne procesy, ale nie wypowiada się o tym, jak powinny różne sprawy wyglądać, ani nie zabrania nam wyobrażać sobie rzeczy, które nie istnieją. Nauka zawiera piękne idee, ale nie wyczerpuje istoty piękna.

Wskazuje jedyną sensowną drogę do zrozumienia świata fizycznego, ale nie jest podręcznikiem życia.

Gdy zdobyłem się na spokojniejszą refleksję, zacząłem doceniać te fakty. Z biegiem czasu coraz głębiej odczuwałem ich prawdziwość.

Dziecko z naszego wprowadzenia jest już teraz dorosłą kobietą, która poznała podstawowe wnioski dotyczące świata fizycznego, jakie płyną z nauki bazującej na ścisłych metodach. Teraz nasza bohaterka jest gotowa do tego, by wrócić do początku swojej przygody z rzeczywistością i spojrzeć na świat na nowo w świetle posiadanej wiedzy. Może podjąć decyzję, by narodzić się na nowo.

Nie jest to łatwy wybór. Wiąże się z utratą spokoju. Ale jeśli chcemy dochować wierności sobie, jest to wybór nieunikniony. W tej książce przedstawiliśmy niewielki podzbiór faktów opisujących podstawy nauki. Dowody potwierdzające ich prawdziwość są przytłaczające i niepodważalne. Zaprzeczanie im byłoby nieuczciwością. Ignorowanie ich – głupotą.

Nasza bohaterka zastanawia się więc ponownie nad podziałem doświadczeń na te, które dotyczą świata wewnętrznego, i te, które są związane ze światem zewnętrznym. Dzięki poznaniu podstaw nauki wiele się dowiedziała na temat materii. Wie, że materia składa się z kilku rodzajów elementów podstawowych, których własności i zachowanie udało nam się szczegółowo zrozumieć. Wie również, z własnego doświadczenia, że wiedza ta pozwala uczonym i inżynierom konstruować zdumiewające urządzenia. Za pomocą smartfona może się połączyć ze znajomymi rozsianymi po całym globie, korzystać bez żadnych ograniczeń z wiedzy zgromadzonej przez ludzkość, a dzięki zdjęciom i filmom – przechować swoje wrażenia zmysłowe, chroniąc je przed niszczącym działaniem czasu.

Dowiedziała się również, że szczególne obiekty, które odpowiadają innym ludziom – a także ona sama – zbudowane są z takiej samej materii jak pozostała część świata. Może teraz dogłębnie zrozumieć wiele tajemniczych do tej pory cech istot żywych, takich jak źródło ich energii (metabolizm), proces rozmnażania (dziedziczność) i badanie otoczenia za pomocą zmysłów (percepcja). Udało nam się bowiem wyjaśnić na dużym poziomie szczegółowości, w jaki sposób cząsteczki – a w ostatecznym

rozrachunku kwarki, gluony, elektrony i fotony – potrafią to wszystko osiągnąć. W każdym z tych przypadków są to skomplikowane procesy zachodzące w materii zgodnie z prawami fizyki. Nic więcej ani mniej.

Świadomość tych faktów w niczym nie umniejsza wspaniałości życia, ale z pewnością podkreśla wspaniałość materii.

W świetle tego wszystkiego przyjęcie postawy, którą wielki biolog Francis Crick nazwał „zdumiewającą hipotezą", wydaje się stanowiskiem skrajnie zachowawczym. Chodzi o hipotezę, że umysł we wszystkich swoich przejawach „nie jest w rzeczywistości niczym innym niż sposobem, w jaki zachowuje się ogromny zbiór komórek nerwowych i związanych z nimi cząsteczek"[76]. Faktycznie, do takiego wniosku możemy dojść po zastosowaniu newtonowskiej metody analizy i syntezy do badania mózgu. Neurobiolodzy przeprowadzili wiele eksperymentów, które bazowały na takim właśnie podejściu. I chociaż nasze rozumienie działania mózgu nadal jest niepełne, taka strategia nigdy nie zawiodła w tysiącach skrupulatnie wykonanych doświadczeń. Nikt nie natrafił na trop żadnej siły umysłu organizmów żywych, która działałaby w oderwaniu od konwencjonalnych zdarzeń fizycznych zachodzących w ciele i mózgu. Nawet w najprecyzyjniejszych doświadczeniach fizycy i biolodzy nie musieli brać pod uwagę tego, co myślą znajdujący się w pobliżu ludzie. Gdyby teraz udało się komuś znaleźć przykład procesu, który jest niezgodny ze „zdumiewającą hipotezą" Cricka, byłoby to naprawdę zdumiewające.

Gdy sobie to uświadomimy, podział na doświadczenia należące do świata wewnętrznego i zewnętrznego wyda nam się powierzchowny. W przypadku dzieci taki podział jest przydatnym odkryciem, a u dorosłych odgrywa rolę użytecznej, ogólnej zasady. Jednak zgodnie z naszą najlepszą wiedzą istnieje tylko jeden świat. W materii, gdy się ją zrozumie na głębokim poziomie, znajduje się dość miejsca również na umysł. A zatem może ona również zawierać światy wewnętrzne przechowywane w umyśle.

Ten zunifikowany obraz świata cechuje się dostojną prostotą, ale także dziwnym pięknem. W ramach takiego modelu musimy pogodzić się z tym, że nie jesteśmy wyjątkowymi obiektami („duszami") istniejącymi poza światem fizycznym, ale raczej spójnymi, dynamicznymi strukturami materii. Jest to niecodzienny punkt widzenia. Zakłada tak silną zależność od podstawowych praw nauki, że wydaje się wręcz naciągany. Jednak ma tę zaletę, że jest prawdziwy. Gdy się już z tym pogodzimy, poczujemy się

wyzwoleni. Właśnie to miał na myśli Albert Einstein, gdy pisał list, który stanowi jego swoiste credo:

> Istota ludzka jest częścią całości zwanej Wszechświatem, częścią, która jest ograniczona w czasie i przestrzeni. Człowiek doświadcza samego siebie, swoich myśli i uczuć, jako czegoś, co jest oddzielone od reszty, w ramach swoistego złudzenia optycznego, które stanowi jego świadomość. To złudzenie jest naszym więzieniem.

Bardzo się starałem, by z tej książki jasno wynikało, że nauka zajmuje się tym, co jest, a nie tym, co powinno być. Może nam pomóc w osiągnięciu naszych celów, gdy już je sobie wyznaczymy, ale nie dokona za nas ich wyboru.

Mimo to w ostatnim rozdziale chciałbym powiązać zunifikowany obraz świata naszej bohaterki z postawą moralną. Moja teza nie ma charakteru dowodu naukowego, ale spójność przemawia za jej prawdziwością.

Jak wiadomo, rozumienie moralności zmieniało się z biegiem czasu. (W tym miejscu analizuję historię z punktu widzenia Amerykanina żyjącego na początku XXI stulecia). Pod wpływem nowych doświadczeń i uzgodnionych reguł ludzie stopniowo porzucali stare poglądy i przyjmowali nowe. Można więc bezpiecznie stwierdzić, biorąc pod uwagę te doświadczenia i uzgodnienia, że nowe poglądy stanowią niezaprzeczalny postęp. W świecie starożytnym niewolnictwo było czymś oczywistym, współcześnie jednak jest powszechnie potępiane, podobnie jak rasizm, seksizm, agresywny nacjonalizm czy okrucieństwo wobec zwierząt. Wspólną cechą wszystkich tych zmian jest poszerzanie kręgu empatii. Dzięki postępowi doszliśmy do wniosku, że inni ludzie i organizmy żywe mają niezbywalną wartość i są godni głębokiego szacunku, tak jak my. Gdy postrzegamy siebie jako struktury materii, w naturalny sposób poszerzamy krąg istot z nami spokrewnionych.

Oto dalszy ciąg credo Einsteina:

> To złudzenie jest naszym więzieniem, które ogranicza nas wyłącznie do naszych pragnień i uczuć żywionych wobec kilku najbliższych nam osób. Musimy postawić przed sobą zadanie wyzwolenia się

z tego więzienia przez poszerzenie kręgu naszych uczuć, tak by objąć nim wszystkie istoty żywe i naturę w całym jej pięknie.

Zadanie wyzwolenia się i poszerzenia kręgu empatii nie jest niezależne od dążenia do zrozumienia podstaw nauki. Przeciwnie, takie zrozumienie pomaga nam w jego realizacji. Wszechświat jest niezwykłym miejscem i wszyscy stanowimy jego część.

76 Francis Crick, *Zdumiewająca hipoteza czyli Nauka w poszukiwaniu duszy*, przeł. Barbara Chacińska-Abrahamowicz i Michał Abrahamowicz, Prószyński i S-ka, Warszawa 1997, s. 17 (przyp. tłum.).

# Podziękowania

Mam ogromne szczęście, że w swoim życiu mogłem liczyć na pomoc wspaniałych, wspierających mnie rodziców, rodziny, nauczycieli i przyjaciół zbyt licznych, by wymienić ich tu wszystkich z osobna. Wydaje mi się jednak, że będzie jak najbardziej na miejscu, jeśli podkreślę, że mam szczególny dług wdzięczności wobec systemu szkolnictwa publicznego miasta Nowy Jork.

Alfred Shapere, Wu Biao, Thomas Houlon i Patty Barnes przeczytali maszynopis książki i przekazali mi cenne uwagi. Podczas pisania książki blisko współpracowałem z redaktorami Christopherem Richardsem i Elizabeth Furlong, a także mogłem liczyć na pomoc wielu innych pracowników wydawnictwa Penguin Press. John Brockman, Katinka Matson i Max Brockman zachęcali mnie do realizacji tego projektu i pomogli mi doprowadzić go do szczęśliwego końca.

# Dodatek

W tym dodatku zamieściłem krótkie omówienie kilku ciekawych kwestii, które poszerzają wiadomości przedstawione w głównej części książki, ale wydały mi się albo zbyt luźno związane z omawianym zagadnieniem, albo niezgodne z duchem książki z uwagi na dużą szczegółowość.

## MASA JAKO WŁASNOŚĆ

Masa odgrywa ważną rolę w dwóch przejawach zachowania cząstek z uwagi na to, że decyduje o ich bezwładności i oddziaływaniu grawitacyjnym. Bezwładność ciała jest miarą jego oporu przed zmianą ruchu. Zatem w większości wypadków ciało o dużej bezwładności będzie się dalej poruszało z taką prędkością, jaką miało w danej chwili, i zmieni ją tylko pod wpływem działania dużych sił. Grawitacja cząstki wyraża się siłą przyciągającą, z jaką działa ona na pozostałe cząstki. Im większa jest masa danej cząstki, tym większa jej grawitacja. Każdy rodzaj cząstki elementarnej ma określoną wartość masy. Masy różnych cząstek są najczęściej różne, a ich wartości nie podlegają żadnej prostej prawidłowości. Wielu fizyków próbowało wyjaśnić obserwowane wartości masy cząstek elementarnych, ale nikomu się to nie udało[77].

Niektóre z najważniejszych cząstek, między innymi fotony, gluony i grawitony, mają zerową masę. Nie oznacza to, że nie mają bezwładności ani że nie oddziałują grawitacyjnie. Nic podobnego – charakteryzuje je inercja i są podatne na wpływ grawitacji. Wyjaśnijmy ten paradoks, który, jak wynika z mojego doświadczenia, bardzo często budzi niepokój uważnych czytelników.

Masa przyczynia się do powstania bezwładności i oddziaływania grawitacyjnego, ale nie jest jedynym czynnikiem, który ma znaczenie. W szczególności poruszająca się cząstka ma większą bezwładność

i wywiera silniejsze przyciąganie grawitacyjne niż cząstka znajdująca się w stanie spoczynku. Z teorii względności jasno wynika, że to energia, a nie masa, wpływa w decydujący sposób na bezwładność i grawitację. W przypadku ciał w stanie spoczynku energia i masa są do siebie proporcjonalne, tak jak wynika to ze słynnego wzoru Einsteina $E = mc^2$, a więc w tej sytuacji możemy wyrażać bezwładność i grawitację za pomocą dowolnej z tych wielkości, stosując je całkowicie zamienne. Gdy ciało porusza się powoli w porównaniu z prędkością światła, związek $E = mc^2$ stanowi nadal dobre przybliżenie rzeczywistości. Tym razem nie popełniamy dużego błędu, twierdząc, że bezwładność i grawitacja są proporcjonalne do masy.

Jednak w odniesieniu do ciał rozwijających prędkość zbliżoną do prędkości światła wzór $E = mc^2$ jest już daleki od prawdy. Nie oznacza to, że Einstein popełnił błąd, ale jedynie to, że w tej sytuacji należy się posługiwać ogólniejszym i bardziej skomplikowanym wzorem, również wyprowadzonym przez Einsteina. Z tego ogólniejszego wzoru wynika, że fotony przenoszą energię, a więc również cechują się bezwładnością i oddziałują grawitacyjnie, mimo iż mają zerową masę.

## ŁADUNEK JAKO WŁASNOŚĆ

Ładunek elektryczny cząstki decyduje o sile, z jaką uczestniczy ona w oddziaływaniach elektromagnetycznych. W głównym tekście omówiliśmy już naturę tej siły. Tutaj skupimy się na samym ładunku elektrycznym, analizując go z punktu widzenia własności cząstek elementarnych.

Dwie cechy ładunku elektrycznego sprawiają, że jest on szczególnie łatwym i wdzięcznym tematem badań. Pierwszą jest jego addytywność, to znaczy fakt, że w celu wyznaczenia całkowitego ładunku elektrycznego jakiegoś skupiska ciał wystarczy zwyczajnie dodać do siebie ładunki poszczególnych elementów. Drugim ważnym faktem jest obowiązywanie zasady zachowania ładunku. Głosi ona, że całkowity ładunek elektryczny w odizolowanym obszarze przestrzeni pozostanie zawsze taki sam, bez względu na to, co się tym obszarze wydarzy. Ładunek może się zmienić,

jeśli coś dodamy lub zabierzemy, ale nie w wyniku przestawiania poszczególnych obiektów lub rozbijania ich o siebie.

Wielkość addytywne, które spełniają zasadę zachowania, są ucieleśnieniem intuicyjnego rozumienia pojęcia „substancja”. Można je do siebie dodawać i nigdy nie znikają. Możemy je dosłownie policzyć.

Ładunki elektryczne cząstek elementarnych przejawiają dużo prostsze i bardziej regularne prawidłowości niż ich masy. Wiele cząstek ma zerowy ładunek elektryczny, a w przypadku cząstek, które są obdarzone jakimś ładunkiem, jego wielkość jest całkowitą wielokrotnością pewnej wspólnej jednostki[78]. Dla jednych cząstek jest to ładunek dodatni, inne mają ładunek ujemny.

Jak powiedzieliśmy, ładunek elektryczny danego ciała decyduje o sile, z jaką reaguje ono na obecność pól elektrycznych i magnetycznych. Istnieją jeszcze dwa inne rodzaje ładunku, przypominające pod wieloma względami ładunek elektryczny, które odgrywają podobną rolę w innych oddziaływaniach podstawowych. Nazywamy je ładunkiem kolorowym (lub kolorem) i ładunkiem oddziaływania słabego (lub ładunkiem słabym).

Ładunek kolorowy danego ciała decyduje o sile, z jaką reaguje ono na obecność pola gluonowego. Zwykłem mówić, że ładunek kolorowy przypomina wzmocniony ładunek elektryczny. Jednostka ładunku kolorowego, który decyduje o sile oddziaływania silnego, jest większa od jednostki ładunku elektrycznego (czyli od ładunku elektronu). Właśnie dlatego oddziaływanie silne jest takie silne. To jeszcze nie wszystko, ponieważ istnieją trzy różne rodzaje ładunku kolorowego i osiem rodzajów gluonów, które reagują na ich obecność – dla porównania, mamy tylko jeden rodzaj ładunku elektrycznego i jeden foton.

Układ równań opisujących oddziaływanie silne, stanowiący istotę chromodynamiki kwantowej (QCD), jest rozszerzoną, bardziej symetryczną wersją równań Maxwella, które opisują elektrodynamikę kwantową (QED), czyli współczesną teorię elektromagnetyzmu. Można więc powiedzieć, że QCD jest wzmocnioną wersją QED.

Ładunek oddziaływania słabego występuje w dwóch odmianach, a jego jednostka jest nieco większa od jednostki ładunku elektrycznego. Fizyczne znaczenie tego ładunku staje się jasne jedynie w kontekście pojęć związanych z kondensatem Higgsa, o czym mówiliśmy w rozdziale 8.

# CZĄSTKI PRZEMIANY

Cząstki, które nazywam cząstkami przemiany, tworzą dwie kategorie. Wuony i zetony oraz bozony Higgsa są około stu razy cięższe od protonów. Są również bardzo niestabilne. Z obu tych faktów – z ich dużej masy i niestabilności – wynika, że są trudne do wytworzenia, a gdy się już pojawią, to istnieją tylko przez chwilę. Wytworzenie i wykrycie tych cząstek było ważnym osiągnięciem badań prowadzonych w akceleratorach cząstek w ostatnich dziesięcioleciach. Natomiast neutrina, należące do drugiej kategorii, są bardzo lekkie i w zasadzie stabilne, ale bardzo słabo oddziałują ze zwyczajną materią (czyli z materią zbudowaną z cząstek konstrukcyjnych). Oto tabela opisująca te cząstki, stanowiąca uzupełnienie podobnej tabeli z własnościami cząstek konstrukcyjnych, którą można znaleźć w tekście głównym:

| | **masa** | **ładunek elektryczny** | **ładunek kolorowy** | **spin** |
|---|---|---|---|---|
| neutrina (3 rodzaje) | < 0,00001 | 0 | nie | ½ |
| wuon | 157 000 | 1 | nie | 1 |
| zeton | 178 000 | 0 | nie | 1 |
| cząstka Higgsa | 245 000 | 0 | nie | 0 |

Choć cząstki te nie są istotnymi składnikami zwyczajnej materii, to jednak odgrywają kluczową rolę w przyrodzie, ponieważ biorą udział w procesach przemiany czy w oddziaływaniach słabych. Energia uwalniana w niektórych tego typu zjawiskach związanych z oddziaływaniem słabym napędza na przykład ruch płyt tektonicznych i stanowi źródło zasilania gwiazd. Dzięki niej mogą również działać reaktory jądrowe i broń nuklearna.

Istnieją trzy rodzaje neutrin, które można odróżnić po tym, że mają nieco inną masę, a w sposobie ich oddziaływania występują subtelne różnice. Wszystkie jednak są niesłychanie lekkie. Jak wynika z zamieszczonej tabeli, ich masa stanowi niewielki ułamek masy elektronu, ale przynajmniej w dwóch przypadkach (a prawdopodobnie we wszystkich trzech) nie jest

równa zeru. Ponieważ mają zerowy ładunek elektryczny i są pozbawione ładunku kolorowego, bardzo słabo oddziałują ze zwyczajną materią, co sprawia, że ich badanie jest ogromnym wyzwaniem. Gdy Wolfgang Pauli wysunął hipotezę istnienia neutrin, do czego skłoniły go wymagania rozważanej teorii, nie napisał formalnego artykułu naukowego na ten temat. Zamiast tego skierował żartobliwy list do uczestników konferencji poświęconej fizyce jądrowej, w którym zawarł następującą uwagę krytyczną pod własnym adresem: „Zrobiłem dzisiaj coś niewybaczalnego, wysuwając hipotezę istnienia cząstki, której nie można wykryć. Czegoś takiego nie powinien robić żaden teoretyk”.

Jednak fizycy doświadczalni stanęli na wysokości zadania, które postawił przed nimi Pauli, i zbudowali gigantyczne detektory wyposażone w czułe mierniki. Obecnie badanie neutrin jest prężnie rozwijającą się dziedziną fizyki doświadczalnej. Dzięki niej udało nam się między innymi zajrzeć do jądra Słońca i zrozumieć gwałtowne przekształcenia prowadzące do wybuchów supernowych.

Ostatnia z wymienionych cząstek, bozon Higgsa, została opisana szczegółowo w rozdziale 8, w którym odgrywa jedną z głównych ról.

## CZĄSTKI DODATKOWE

Teraz zajmiemy się grupą cząstek elementarnych, których znaczenia tak naprawdę nikt nie potrafi wyjaśnić. Wszystkie te nadmiarowe cząstki są niestabilne. Uczeni odkryli je w pozostałościach po zderzeniach zachodzących z wysoką energią, do których dochodzi w wyniku oddziaływania promieni kosmicznych (takie badania prowadzono szczególnie na początku XX wieku) albo w wyniku zderzeń w akceleratorach cząstek (w badaniach prowadzonych obecnie). Gdy w 1936 roku odkryto pierwszą z tych cząstek, nazwaną mionem, szanowany fizyk I.I. Rabi dał wyraz zakłopotaniu całej społeczności uczonych, stawiając pytanie, które przeszło już do historii: „Kto to zamawiał?”.

Masy tych nadmiarowych cząstek obejmują szeroki zakres wartości i nie wykazują żadnej oczywistej prawidłowości, o czym można się przekonać,

zaglądając do poniższej tabeli:

| | **masa** | **ładunek elektryczny** | **ładunek kolorowy** | **spin** |
|---|---|---|---|---|
| kwark *c* | 2495 | 2/3 | tak | ½ |
| kwark *t* | 339 000 | 2/3 | tak | ½ |
| kwark *s* | 180 | –1/3 | tak | ½ |
| kwark *b* | 8180 | –1/3 | tak | ½ |
| mion | 207 | –1 | nie | ½ |
| taon | 3478 | –1 | nie | ½ |

Cząstki te tworzą trzy grupy. Przyglądając się ich własnościom, można zauważyć, że kwarki *c* i *t* są cięższymi, niestabilnymi wersjami kwarka *u*, kwarki *s* i *b* są cięższymi, niestabilnymi wersjami kwarka *d*, natomiast mion i taon stanowią cięższe, niestabilne wersje elektronu.

Nasza ostatnia „cząstka elementarna” wciąż jeszcze jest przedmiotem badań. Prowadząc obserwacje, astronomowie w wielu sytuacjach zauważyli dużo silniejszy wpływ grawitacyjny, niż można to wyjaśnić. Nie chodzi tu o małą różnicę: aby wytworzyć taką grawitację, jaka wynika z obserwacji, potrzeba około sześciokrotnie większej masy, niż może jej dostarczyć zwyczajna materia. Jest to tak zwany problem ciemnej materii, o którym mówiliśmy w rozdziale 9.

Problem ten mogłaby rozwiązać cząstka elementarna o odpowiednich własnościach, ponieważ mogłaby być źródłem owej tajemniczej grawitacji. W ogólnym ujęciu obserwacje dopuszczają takie wyjaśnienie, ale niestety nie udzielają wystarczająco dużo informacji, by można było uściślić najważniejsze własności tej cząstki, takie jak jej masa czy spin.

| | **masa** | **ładunek elektryczny** | **ładunek kolorowy** | **spin** |
|---|---|---|---|---|
| ciemna materia | nieznana | 0 | nie | nieznany |

## PO DODATKOWE INFORMACJE ZAJRZYJ DO KATEDRY

Strona internetowa zespołu Particle Data Group jest dostępna pod adresem http://pdg.lbl.gov. Uczeni pracujący w tym zespole archiwizują i szczegółowo dokumentują dowody empiryczne stanowiące podstawy naszej wiedzy na temat kosmologii, a także materii i jej oddziaływań. Jest to prawdziwa katedra nauki wzniesiona w pocie czoła przez społeczność naukowców rozproszonych po całym globie, którzy zajmują się tym już od kilku pokoleń. Ich dzieło to wspaniały hołd złożony fizycznej rzeczywistości.

## QCD BEZ TAJEMNIC: DŻETY

Oddziaływanie silne działające między kwarkami i gluonami staje się słabsze nie tylko w przypadku *niewielkich* odległości w czasie i przestrzeni, ale także w sytuacji gdy mamy do czynienia z *dużymi* zmianami energii i pędu. Te dwa fakty są przejawem swobody asymptotycznej. Równania mechaniki kwantowej pozwalają nam wzajemnie wyprowadzać oba te fakty jeden z drugiego.

Bardzo rzadko występujące duże zmiany energii i pędu wiążą się z niezwykłym zjawiskiem, które stało się najważniejszą cechą oddziaływań zachodzących w wysokiej energii. Mam tu na myśli zjawisko znane jako *dżety*. Dzięki niemu możemy zobaczyć jak na dłoni istotę chromodynamiki kwantowej. Umożliwia ono obserwacje kwarków, gluonów i ich podstawowych oddziaływań w zaskakująco bezpośredniej, namacalnej postaci.

Rozważmy, co się dzieje, gdy kwark znajdujący się w środku protonu zostaje nagle wyszarpnięty przez siłę zewnętrzną. Źródłem tej zewnętrznej siły może być na przykład rozpędzony elektron. Kwark, wyrwany ze swojego normalnego otoczenia, opuszcza proton, unosząc ze sobą dużą wartość energii i pędu. Pojedynczy kwark znajduje się jednak w sytuacji, która jest nie do utrzymania. Jego niezrównoważony ładunek koloru zaburza równowagę pól gluonowych i powoduje promieniowanie gluonów. W ten sposób kwark pozbywa się energii i pędu. Powstałe dzięki temu

gluony również emitują promieniowanie, które ma postać albo innych gluonów, albo kwarków i antykwarków. Wybity kwark zostawia więc za sobą smugę kwarków, antykwarków i gluonów, które następnie łączą się w protony, neutrony i inne hadrony. Jak już mówiliśmy, kwarki, antykwarki i gluony nie materializują się w postaci niezależnych cząstek, lecz zawsze występują w towarzystwie (tworząc hadrony).

Można odnieść wrażenie, że jest to bardzo skomplikowany proces, i faktycznie tak jest. Jednak swoboda asymptotyczna wymusza zachowanie pewnej struktury w całym tym bałaganie. Ponieważ emisja promieniowania wiążącego się z przesyłem dużej energii i pędu jest zjawiskiem rzadkim – wynika to ze swobody asymptotycznej – wszystkie cząstki tworzące ten strumień poruszają się zazwyczaj w tym samym kierunku. W ostatecznym rozrachunku badacze obserwują wiele śladów cząstek pojawiających się we wnętrzu obszaru w kształcie wąskiego stożka. Fizycy mówią w takiej sytuacji, że cząstki te tworzą *dżet*. Ponieważ energia i pęd są wielkościami zachowywanymi, całkowita energia i pęd wszystkich cząstek tworzących dżet musi dawać w sumie wartość energii i pędu pierwszego wybitego kwarka.

Dżety są wspaniałym darem dla fizyków. Ponieważ zawierają informacje o energii i pędzie cząstek, które je zainicjowały, stanowią swoiste awatary tych cząstek. Dzięki nim kwarki i gluony stają się obiektami namacalnymi, mimo iż same nie mogą istnieć jako niezależne cząstki. Potrafimy przetłumaczyć przewidywania dotyczące zachowania kwarków i gluonów na wartości opisujące spodziewane własności dżetów. Dzięki dżetom możemy więc dokładnie i bardzo szczegółowo zweryfikować podstawowe prawa chromodynamiki kwantowej, które są stwierdzeniami opisującymi kwarki i gluony. Dżety pozwalają nam również badać inne procesy, znane i hipotetyczne, w których te cząstki uczestniczą.

Przyjęło się, że prezentując wyniki badań, fizycy doświadczalni podają, ile kwarków i gluonów powstało w obserwowanych reakcjach, jaki był rozkład ich energii i kątów i tym podobne. W rzeczywistości badacze zobaczyli tylko odpowiadające im dżety, ale po wielu tysiącach udanych doświadczeń opisywanie kwarków i gluonów, które je wywołały, stało się rutynową praktyką. Kwarki i gluony pojawiły się w nauce jako dziwne, podejrzane teoretyczne zjawy – uwięzione cząstki, które zgodnie z teorią nigdy nie zostaną zaobserwowane w odosobnieniu. Dzięki pięknym ideom

stały się namacalną częścią rzeczywistości – nie przyjęły jednak postaci zwyczajnych cząstek, tylko dżetów.

## GEOMETRIA PRZESTRZENI I GĘSTOŚĆ MATERII

Z ogólnej teorii względności wynika niezwykły związek między średnią krzywizną przestrzeni, średnią gęstością zawartej w niej materii i szybkością rozszerzania się Wszechświata. Jeśli całkowita gęstość materii jest równa pewnej określonej gęstości krytycznej, to przestrzeń pozostanie płaska; jeśli gęstość jest większa od tej wartości, to przestrzeń będzie miała dodatnią krzywiznę, niczym sfera; jeśli zaś gęstość jest mniejsza, to przestrzeń będzie zakrzywiona ujemnie, podobnie do powierzchni siodła.

W chwili obecnej gęstość krytyczna wynosi około $10^{-29}$ grama na centymetr sześcienny. Jest to wartość równoważna masie około sześciu atomów wodoru na metr sześcienny. Choć okazuje się ona dużo mniejsza od najlepszej „próżni doskonałej”, jaką udało nam się wytworzyć w laboratoriach na Ziemi, to jednak wydaje się, że jest zbliżona do średniej gęstości całego Wszechświata.

Astronomowie potrafią mierzyć kształt przestrzeni metodami geometrycznymi z wykorzystaniem ulepszonych wersji techniki, którą opisaliśmy w rozdziale 1. Mogą również mierzyć gęstość przez zsumowanie wkładu wnoszonego przez zwyczajną materię, ciemną materię i ciemną energię. Tego typu badania prowadzą do wniosku, że przestrzeń jest niemal doskonale płaska, a gęstość materii – bardzo bliska gęstości krytycznej. Taki wynik zgadza się z przewidywaniami ogólnej teorii względności. Zgodność ta sugeruje, że rozwiązanie zagadki ciemnej materii i ciemnej energii powinno być możliwe w ramach formalizmu ogólnej teorii względności. Do wyjaśnienia tego problemu z pewnością nie jest *konieczna* modyfikacja teorii względności.

77 Ściśle rzecz biorąc, nikomu nie udało się przekonać innych, że proponowane wyjaśnienie jest poprawne.

78 To jest trzecia wygodna własność ładunku elektrycznego. Fizycy mówią czasem, że ładunek elektryczny jest „skwantowany”, choć takie stwierdzenie może być mylące.

# Spis treści


Przedmowa: zrodzeni na nowo
Wprowadzenie
I. Co istnieje
    1. Istnieje mnóstwo przestrzeni
    2. Istnieje mnóstwo czasu
    3. Istnieje tylko kilka składników
    4. Istnieje tylko kilka praw
    5. Istnieje mnóstwo materii i energii
II. Początki i końce
    6. Historia kosmosu jest otwartą księgą
    7. Powstaje złożoność
    8. Zostaje jeszcze bardzo dużo do zobaczenia
    9. Pozostałe tajemnice
    10. Komplementarność poszerza horyzonty
Posłowie: długa podróż do domu
Podziękowania
Dodatek